Prospek dan Kendala pada Pemakaian Material Baja untuk Konstruksi Bangunan di Indonesia[1]

Wiryanto Dewobroto
email : wir@uph.edu

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan
Karawaci, Tangerang, Banten

Abstrak :

Istilah konstruksi bangunan digunakan untuk merujuk pada kegiatan membangun segala prasarana yang diperlukan manusia untuk mempertahankan sekaligus mengembangkan peradabannya. Jadi tidak salah, jika dari konstruksi bangunan yang ditinggalkannya maka suatu bangsa dapat dilihat tingkat kemajuannya. Untuk itu berbagai bahan material telah banyak diteliti dan digunakan untuk konstruksi, mulai dari tanah, batu, kayu, beton, baja atau beberapa lagi yang mungkin dapat disebutkan. Tetapi jika fokusnya dibatasi pada konstruksi bangunan yang berupa jembatan dan gedung, maka bahan material yang dapat dipilih relatif terbatas, yaitu kayu, beton, dan baja, atau kombinasinya.

Pemilihan bahan material yang sesuai adalah tahapan penting dan ternyata banyak faktor yang mempengaruhi. Kriteria kekuatan dan kekakuan umumnya dijadikan pertimbangan utama para insinyur memilih bahan material konstruksi. Tetapi itu tidak menjamin bahwa material yang unggul pada kriteria tersebut dipastikan akan mendominasi pemakaiannya, sebagaimana yang terjadi pada pemakaian konstruksi bangunan baja di Indonesia.

Makalah ini akan membahas prospek dan kendala pemakaian konstruksi bangunan baja secara umum dan Indonesia khususnya, ditinjau dari sisi akademisi. Sehingga nantinya dapat dilakukan tindakan nyata agar para pemangku kepentingan suatu proyek (*owner*, arsitek, insinyur, kontraktor) mendapatkan kepuasan ketika memilih konstruksi baja.

Kata kunci: prospek dan kendala, bahan material, konstruksi / struktur baja.

1. PENDAHULUAN

Berbicara tentang "konstruksi bangunan" tentunya akan merujuk pada kegiatan mewujudkan segala prasarana fisik yang dibutuhkan manusia dalam mempertahankan dan mengembangkan peradabannya. Jadi dari melihat konstruksi bangunan yang ditinggalkannya maka suatu bangsa dapat dilihat tingkat kemajuannya. Sebagai buktinya, di level internasional misalnya, piramida Giza di Mesir yang dibangun ± 5000 tahun lalu, maka tentunya dapat dibayangkan bagaimana tingginya peradaban bangsa tersebut dibanding bangsa lain yang mungkin pada masa tersebut masih hidup seperti jaman batu (tidur di goa). Karena itu pula, Indonesia tidak kalah bangganya mempunyai peninggalan kuno abad 9 M, yaitu Borobudur dan Prambanan. Bukti fisik seperti itu tentu dapat dijadikan petunjuk bahwa bangsa Indonesia pernah menjadi bangsa yang maju tingkat peradabannya pada suatu masa dahulu.

Berkaitan dengan hal itu, berbagai bahan material telah banyak diteliti dan digunakan untuk material konstruksi bangunan, mulai yang sederhana, yang tersedia di alam bebas, maupun bahan material khusus buatan pabrik yang mahal. Bahan material yang dimaksud misalnya berupa tanah, batuan (*rock*), kayu, bambu, beton, baja dan beberapa lagi yang mungkin dapat disebutkan. Meskipun demikian, jika fokus pembahasan konstruksi bangunan dibatasi pada bangunan yang dekat dengan masyarakat, seperti konstruksi bangunan jembatan dan gedung, maka jenis material konstruksi yang dapat dipilih untuk digunakan (apalagi di Indonesia) menjadi terbatas, yaitu kayu, beton, baja atau kombinasi dari ketiganya itu saja.

[1] ***Invited Speaker*** Seminar "***Future Prospect on Steel for Construction***", yang diselenggarakan **PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk** dan **Nippon Steel Corporation**, di Hotel Gran Melia - Jakarta, Kamis 7 April 2011

Pemilihan bahan material konstruksi, apakah kayu, beton atau baja adalah tahapan penting dalam suatu perencanaan. Kriteria dasar yang digunakan adalah: [1] **kekuatan** (tegangan); [2] **kekakuan** (deformasi); dan [3] **daktilitas** (perilaku runtuh).

Tetapi material yang unggul pada ke-tiga kriteria di atas ternyata tidak mesti mendominasi pemakaiannya pada proyek konstruksi bangunan, banyak faktor lain mempengaruhi. Seperti misalnya, material baja yang jelas menurut kriteria di atas lebih unggul dibanding beton atau kayu, tetapi fakta-fakta lapangan menunjukkan bahwa konstruksi baja belum mendominasi proyek bangunan Indonesia, kalah populer dibanding konstruksi beton. Itu dapat dilihat pada proyek-proyek gedung tinggi, juga pada konstruksi bangunan jembatan. Konstruksi beton prategang terkesan mulai banyak dipakai sebagai alternatif digunakannya jembatan baja.

Argumentasi yang sering dipakai menjelaskan fenomena tersebut adalah harga yang mahal. Apakah benar seperti itu, apakah bukan hal lain atau juga ketidak-tahuan pemakai sehingga kontruksi bajanya menjadi tidak optimal dan pada akhirnya merasa kecewa. Oleh karena itu makalah ini akan mengupas hal-hal yang dapat dianggap **prospek** maupun **kendala** dalam usaha mengoptimalkan pemakaian material baja pada proyek konstruksi di Indonesia.

2. PERILAKU MEKANIK MATERIAL KONSTRUKSI

Kriteria perencanaan struktur adalah memenuhi syarat **kekuatan**, **kekakuan** dan **daktilitas**. Kekuatan dikaitkan dengan besarnya tegangan yang mampu dipikul tanpa rusak, baik berupa deformasi besar (*yielding*) atau *fracture* (terpisah). Parameternya berupa tegangan leleh dan *ultimate*. Faktor kekakuan adalah besarnya gaya untuk menghasilkan satu unit deformasi, parameternya berupa Modulus Elastisitas. Faktor daktilitas terkait dengan besarnya deformasi sebelum keruntuhan (*failure*) terjadi, suatu faktor penting untuk perencanaan struktur dengan pembebanan tak terduga atau sukar diprediksi (gempa atau angin). Properti mekanik beberapa macam bahan material konstruksi dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1.

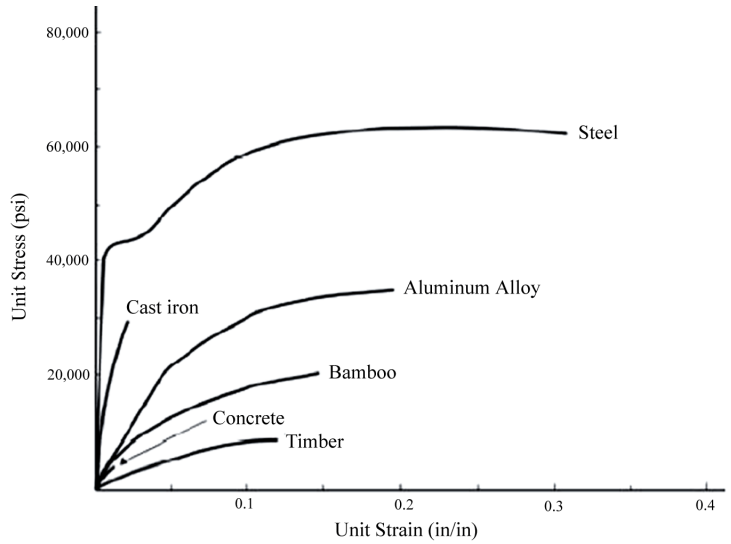
Tabel 1. Properti Mekanik Beberapa Bahan Material Konstruksi

Material	**Berat Jenis (BJ)** (kg/m^3)	**Modulus Elastis** (MPa)	**Kuat** (MPa)		**Rasio Kuat ÷ BJ (1E+6 * 1/mm)**
			Leleh	**Ultimate**	
Serat karbon	1760	150,305	-	5,650	321
Baja A 36	7850	200,000	250	400 – 550	5.1 – 7.0
Baja A 992	7850	200,000	345	450	5.7
Aluminum	2723	68,947	180	200	7.3
Besi cor	7000	190,000	-	200	2.8
Bambu	400	18,575	-	60*	15
Kayu	640	11,000	-	40*	6.25
Beton	2200	21,000 – 33,000	-	20 – 50	0.9 – 2.3

* Rittironk and Elnieiri (2008)

Jadi jika parameter kekuatan, kekakuan dan daktilitas digunakan untuk pemilihan material konstruksi maka dapat dengan mudah ditentukan bahwa material baja adalah yang unggul dibandingkan beton dan kayu. Rasio kuat dibanding berat untuk volume yang sama dari baja ternyata lebih tinggi (efisien) dibanding beton. Ini indikasi jika perencanaannya optimal maka bangunan dengan konstruksi baja tentunya akan menghasilkan sistem pondasi yang lebih ringan dibanding konstruksi beton, meskipun masih kalah dibanding kayu atau bambu.

Dikaitkan efisiensi antara material baja dengan kayu atau bambu, maka baja hanya unggul karena kualitas mutu bahannya yang lebih homogen dan konsisten sehingga lebih handal. Itu tidak mengherankan karena material baja adalah produk industri yang dapat terkontrol baik. Jadi, jika material kayu / bambu di Indonesia suatu saat juga didukung teknologi yang dapat menjamin kualitas mutunya homogen dan konsisten maka tentu akan menjadi bahan material konstruksi yang handal juga, khususnya untuk struktur ringan dan semacamnya.



Gambar 1. Perilaku mekanik beberapa material konstruksi *(Rittironk and Elnieiri 2008)*

Bangunan yang ringan selain menghemat pondasi, juga menguntungkan untuk perencanaan bangunan tahan gempa. Seperti diketahui bahwa gaya gempa pada bangunan ditentukan oleh percepatan tanah (***a***) dan juga massa bangunan (***m***), yang mana besarnya berbanding lurus, yaitu $\boldsymbol{F = m \cdot a}$. Jadi bangunan dengan massa kecil maka gaya gempanya juga kecil.

Meskipun baja mempunyai keunggulan terhadap gempa karena sifatnya yang ringan, tetapi kondisi tersebut tidak menguntungkan terhadap pembebanan angin. Tetapi karena sifat baja yang mempunyai kekuatan tinggi dan daktail, juga didukung proses perencanaan yang baik maka kelemahan terhadap angin mestinya dapat dengan mudah diatasi.

Sampai tahap ini pemakaian material baja masih terlihat unggul, khususnya jika parameter kekuatan, kekakuan dan daktilitas dijadikan tolok ukur. Tetapi yang menjadi pertanyaannya adalah: "*Mengapa sampai saat ini penggunaan konstruksi baja tidak dominan di tanah air*". Bahkan jika melihat pembangunan gedung bertingkat tinggi dan menengah di Jakarta, maka dapat diperkirakan bahwa volume penjualan tulangan baja untuk konstruksi beton bertulang akan lebih banyak dibanding volume penjualan baja profil untuk konstruksi baja. Kondisi ini pula yang mungkin mendasari mengapa masih diperlukan seminar tentang baja seperti ini.

Berarti selain ketiga parameter di atas untuk menentukan material, tentunya ada hal-hal lain yang menjadi pertimbangan sehingga membuat keraguan untuk akhirnya memilih baja. Bisa juga itu terjadi karena pengetahuan para pengambil keputusan adalah tidak lengkap, karena bagaimanapun juga pada konstruksi baja ada banyak keunggulan sehingga berprospek baik, meskipun untuk itu ada hal-hal yang perlu dipersiapkan dengan usaha serius. Oleh karena itulah maka pada makalah ini, penulis cenderung memilih menjabarkan hal-hal tersebut dan strategi mengatasinya, sehingga diharapkan faktor-faktor tersebut tidak menjadi kendala lagi. Bagaimanapun juga, jika suatu bahan material dipandang unggul dibanding yang lain maka tentunya itu akan otomatis menjadi pilihan. Jika ini terjadi maka jelas dominasi baja sebagai bahan material konstruksi di Indonesia tinggal soal waktu saja.

3. SIFAT MATERIAL BAJA

3.1. Umum

Material baja unggul jika ditinjau dari segi kekuatan, kekakuan dan daktilitasnya. Jadi tidak mengherankan jika di setiap proyek-proyek konstruksi bangunan (jembatan atau gedung) maka baja selalu ditemukan, meskipun tentu saja volumenya tidak harus mendominasi.

Tinjauan dari segi kekuatan, kekakuan dan daktilitas sangat cocok dipakai mengevaluasi struktur yang diberi pembebanan. Tetapi perlu diingat bahwa selain kondisi tadi akan ada pengaruh lingkungan yang mempengaruhi kelangsungan hidup struktur bangunannya. Jadi pada suatu kondisi tertentu, suatu bangunan bahkan dapat mengalami kerusakan meskipun tanpa diberikan beban sekalipun (belum berfungsi). Jadi ketahanan bahan material konstruksi terhadap lingkungan sekitarnya adalah penting untuk diketahui agar dapat diantisipasi baik.

3.2. Material buatan pabrik

Kelebihan material baja dibandingkan material beton atau kayu adalah karena buatan pabrik, yang tentunya mempunyai kontrol mutu yang baik. Oleh karena itu dapat dipahami bahwa kualitas material baja yang dihasilkannya relatif **homogen** dan **konsisten** dibanding material lain, yang berarti juga **lebih dapat diandalkan mutunya**.

Gambar 2. Stock profil baja buatan pabrik *(sumber : internet)*

Di sisi lain karena merupakan hasil produk industri, maka agar prosesnya menguntungkan harus diusahakan mencapai kondisi optimum. Untuk itu diperlukan suatu kuantitas tertentu yang terkesan relatif monoton serta tidak mudah dibuat variasinya. Itulah pentingnya dibuat **standarisasi** bentuk profil. Dari tabel profil baja yang ada terlihat banyak sekali profil yang tersedia, tetapi dalam kenyataannya jika peminatnya relatif sedikit maka profil yang jarang dipakai tentunya tidak diproduksi banyak. Jadi akhirnya tidak semua profil pada tabel dapat dipilih. Hanya profil-profil tertentu yang memang umum (banyak) digunakan. Hal ini perlu diketahui insinyur perencana konstruksi baja, jangan hanya berpedoman teoritis hitungan, karena kalau sampai mengubah profil rencana dengan profil tersedia, kemungkinan berubah pula detail sambungan yang dibuat. Jika ini tidak dipikirkan waktu dapat terbuang sia-sia.

a). Pabrik baja ke bengkel fabrikasi ***b). Bengkel fabrikasi ke proyek (site)***

Gambar 3. Kebutuhan transportasi pada pekerjaan konstruksi baja *(sumber : internet)*

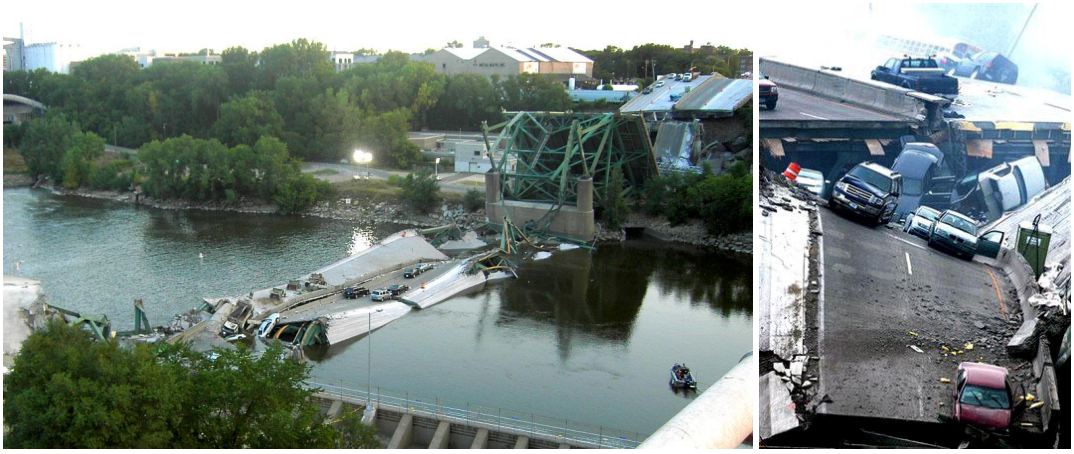
Tidak ada jaminan bahwa lokasi pabrik baja akan berdekatan dengan proyek atau bengkel fabrikasi, sehingga panjang profil baja ditentukan oleh kemampuan **kendaraan transportasi** pengangkut (truk atau kapal) dan **jalur transportasi** (darat atau air) yang akan dilaluinya.

3.3. Ketahanan korosi

Baja unggul ditinjau dari segi kemampuannya menerima beban, tetapi ketika dibiarkan tanpa perawatan khusus di lingkungan terbuka, terlihat lemahnya. Baja yang unsur utamanya besi mengalami korosi, yaitu suatu proses elektrokimia. Jika itu terjadi, maka pada bagian besi yang bertindak sebagai anode akan terjadi oksidasi yang merusak dan menghasilkan karat besi $Fe_2O_3.nH_2O$, zat padat berwarna coklat kemerah-merahan. Volume baja berkurang karena menjadi karat tadi. Mengenai bagian besi yang bertindak sebagai anode dan bagian mana yang bertindak sebagai katode tergantung pada banyak faktor, misalnya zat pengotor, atau adanya perbedaan rapatan logam itu, atau ada jenis logam lain yang bersinggungan.

Kemungkinan terjadinya korosi pada baja merupakan kelemahan konstruksi baja dibanding kontruksi beton. Oleh sebab itu saat perencanaan faktor ini harus diantisipasi dengan baik.

Korosi yang terjadi pada konstruksi baja adalah ibarat kanker, senyap tetapi akibatnya bisa sangat mematikan. Bahkan itu dapat terjadi di negara maju sekalipun, yang mana sebenarnya telah banyak dilakukan penelitian tentang hal itu, tetapi ternyata bisa juga kecolongan.



Gambar 4. Keruntuhan tiba-tiba jembatan berumur 40 tahun di Minnesota (2007)

Meskipun umur konstruksi relatif masih muda (± 40 tahun), tetapi jembatan I-35 di sungai Mississippi, Minneapolis, Minnesota, USA, yang dibangun tahun 1967 tiba-tiba runtuh pada hari Rabu, tanggal 1 Agustus 2007. Kebetulan saat jam sibuk. Setelah melalui penyelidikan diketahui bahwa penyebabnya adalah korosi logam (Sumber : en.wikipedia.org).

Atas ↑ : bagian yang korosi dan dianggap sebagai pemicu awal terjadinya keruntuhan.

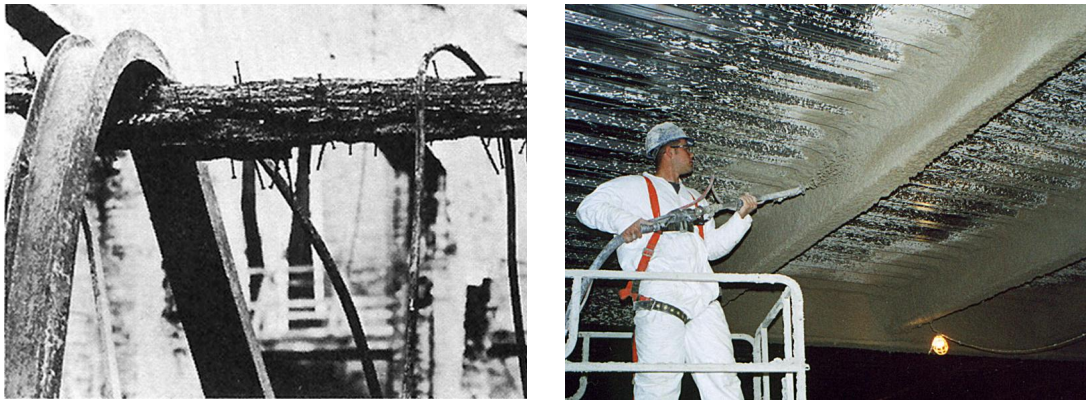
← **Kiri** : photo 2005 sebelum runtuh.

Gambar 5. Korosi sebagai penyebab keruntuhan *(Sumber : en.wikipedia.org)*

Kata kunci pencegahannya adalah selalu waspada, saat awal perlu hati-hati dalam pemilihan sistem pencegahan korosi yang tepat dan terakhir dukungan perawatan yang berkelanjutan.

3.4. Perilaku pada suhu tinggi

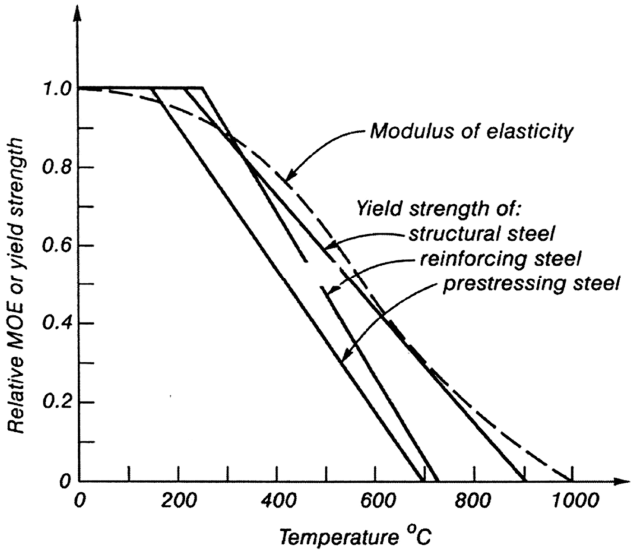
Bangunan konstruksi baja memang tidak akan terbakar jika terkena panas api saat kebakaran, tetapi akibat suhu yang tinggi dapat mengalami penurunan kekuatan drastis, bahkan tidak kuat memikul berat sendiri. Sehingga bila terjadi kebakaran yang lama maka bisa saja fungsi sebagai struktur pemikul beban menjadi hilang dan bangunan mengalami keruntuhan total.



a). Profil baja setelah suatu kebakaran ***b). Fireproofing pada balok-atap***

Gambar 6. Pengaruh panas tinggi pada profil baja dan pencegahannya *(sumber : internet)*

Gambar 6a memperlihatkan profil baja setelah kebakaran yang mengalami deformasi ekstrim sehingga fungsinya sebagai struktur jadi terganggu. Untuk mencegah, diberi *fireproofing* agar kenaikan temperatur ekstrim saat kebakaran dapat dihambat. Harapannya tentu tidak membuatnya menjadi suatu bangunan tahan api, tetapi minimal agar perlu waktu lama untuk terjadi kenaikan temperature, sehingga ada waktu pemadaman api tanpa struktur mengalami kerusakan berarti. Penurunan kekuatan terjadi setelah temperatur melebihi ± 300^{o}C, baik dari kuat leleh maupun modulus elastis, dua parameter penting yang berkaitan dengan kekuatan dan kekakuan bahan material. Kurva penurunannya dapat dilihat pada diagram di bawah ini.



Gambar 7. Perilaku Material Baja pada berbagai Temperature *(Kodur 2003)*

Penambahan bahan *fireproofing* jelas akan memberikan tambahan beban, sehingga kriteria sebagai bangunan ringan menjadi berkurang dan biayanya meningkat. Meskipun demikian karena sifatnya yang melapisi maka hal itu baik juga untuk melindunginya dari resiko korosi. Jadi pemberian *fireproofing* juga merupakan *double protection* bagi konstruksi baja.

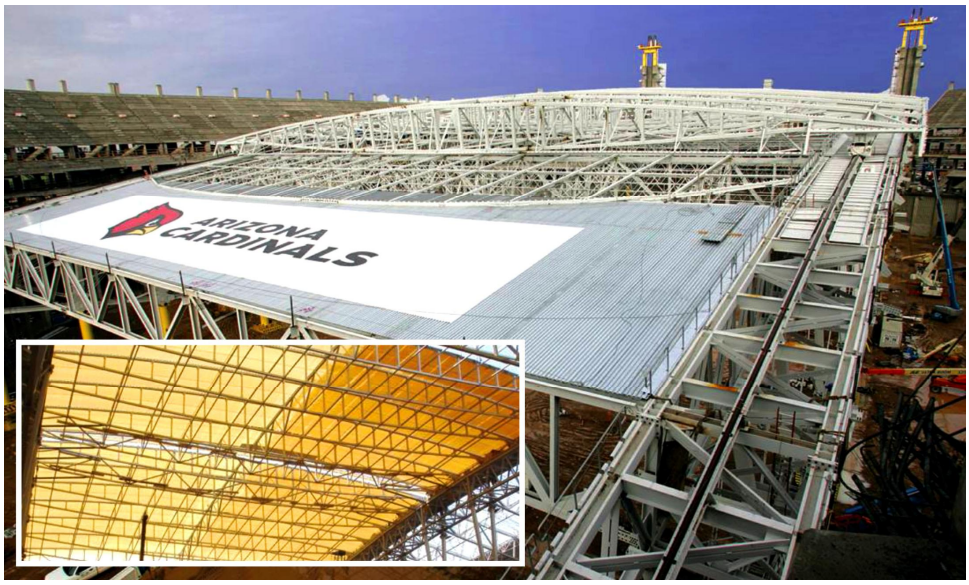
4. SUPERIORITAS KONSTRUKSI BAJA

4.1. Pentingnya superioritas.

Permasalahan tentang superior atau tidaknya suatu produk, penting jika dikaitkan dengan usaha pemasaran produk tersebut. Tanpa memahami falsafah mendasar yang menyebabkan keunggulannya maka penyampaiannya akan mudah dipatahkan. Demikian juga konstruksi baja, dasar argumentasinya kuat jika didasarkan pada keunggulan alaminya dibanding beton dan kayu, yaitu [1] kekuatan tinggi; [2] tingginya ratio kuat terhadap berat-volume; dan yang terakhir [3] merupakan material atau modul siap pakai karena telah dibuat dahulu di pabrik.

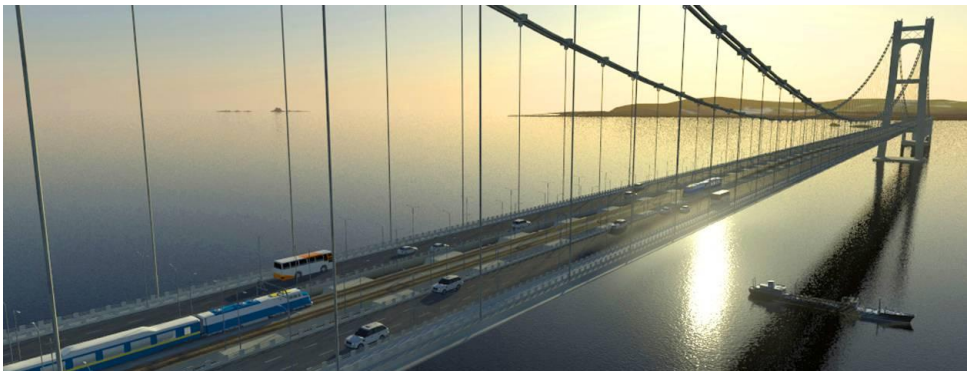
4.2. Struktur dengan berat sendiri yang dominan.

Fungsi struktur ada bermacam-macam, tidak mesti untuk memikul beban berat. Atap bentang besar misalnya, yang melindungi dari terik panas dan hujan, mungkin juga salju. Berat atap yang dipikulnya relatif ringan, tetapi karena bentangnya maka yang menimbulkan masalah adalah berat sendiri struktur. Nah untuk struktur yang seperti itu, maka ratio kuat dibanding berat volume bahan menjadi sangat menentukan untuk menghasilkan struktur yang efisien.



Gambar 8. Konstruksi atap Stadium Universitas Phoenix *(MSC 2010)*

Dengan alasan yang sama pula maka penggunaan material baja menjadi pilihan utama untuk jembatan ultra panjang, yang mana berat lalu-lintas yang dipikul relatif kecil dan sudah tidak sebanding dengan berat sendiri strukturnya. Itu merupakan argumentasi sederhana mengapa untuk Jembatan Selat Sunda (JSS) dipilih konstruksi jembatan gantung dari baja.



Gambar 9. Impresi artis tentang Jembatan Selat Sunda *(Sumber : W. Wangsadinata)*

4.3. Struktur yang sekaligus bagian metode pelaksanaan.

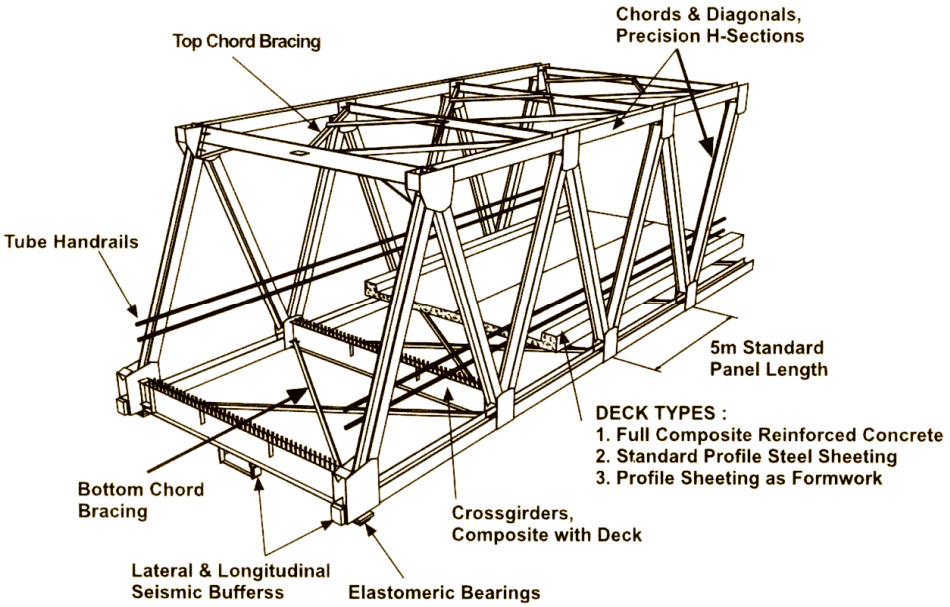
Baja yang berkekuatan tinggi tetapi relatif ringan, dan sudah dalam bentuk jadi (siap pakai), membuatnya terpilih untuk digunakan sekaligus sebagai bagian dari metode pelaksanaan. Cara ini sangat efektif, jika kondisi di lapangan tidak memungkinkan atau mahal jika harus dibuatkan perancah terlebih dahulu. Umumnya cara ini efektif pada proyek-proyek jembatan.

Gambar 10. Metode pelaksanaan jembatan bentang besar *(Sumber : L. Hidayat)*

Gambar 10 memperlihatkan metode pelaksanaan jembatan Rumpiang (754 m), di atas sungai Barito, Kalimantan Selatan (2003 – 2008). Dengan alat-alat *crane* yang relatif sederhana dan dengan memanfaatkan elemen jembatan yang telah selesai dirakit, maka dapat dibuat alat bantu pelaksanaan berupa struktur kantilever sekedar untuk proses penyelesaian konstruksi saja. Jadi pilar menara di atas pondasi akan dilepas setelah proses konstruksi selesai.

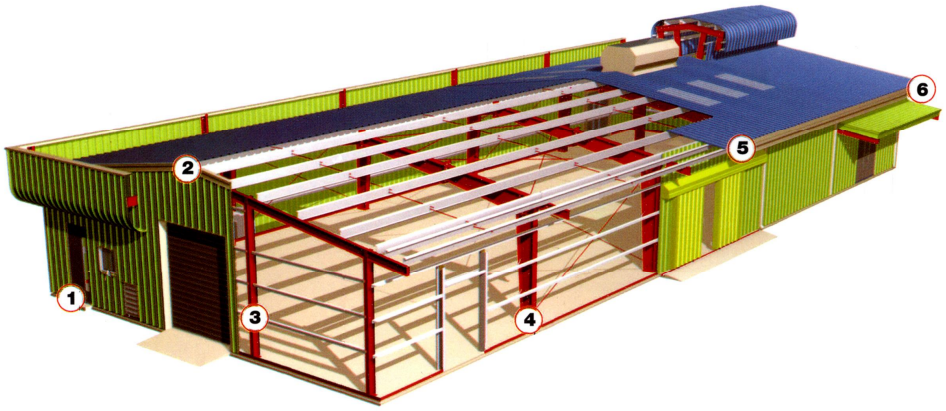
4.4. Struktur dengan modul seragam, berulang dan berkuantitas besar.

Ini adalah keunggulan suatu produk buatan pabrik, jadi jika produknya dapat dibuat seragam, berulang, dan diperlukan dalam jumlah yang banyak maka dapat dilakukan proses optimasi serta efisiensi. Ini tentu sangat berbeda dengan sifat proyek itu sendiri, yang umumnya khas dan terbatas. Sehingga cara ini hanya akan unggul jika didukung oleh suatu proyek besar dalam arti jumlah, maupun jangka waktunya, seperti yang pernah terjadi pada pengadaan jembatan standar (balok komposit atau rangka baja) era tahun 1980 – 1990 di tanah air.



Gambar 11. Jembatan Rangka Baja Standar *(Sumber : Trans Bakrie)*

Kecuali jembatan standar maka pengadaan menara baja untuk kabel tegangan tinggi pada pembangunan jaringan listrik juga salah satu kemungkinannya, termasuk proyek menara telekomunikasi. Pada bangunan gedung misalnya jenis *Pre-Engineered Steel Buildings* untuk komplek industri, maupun perumahan karyawan suatu perusahaan besar yang ada di daerah terpencil, yang harus segera dibangun tetapi permanen, kuat dan kaku.



Gambar 12. Bangunan Pre-Engineering Steel Buildings *(Sumber : Zamil Steel)*

4.5. Struktur kuat - ringan dan cepat dibangun bahkan di tempat terpencil

Meskipun argumentasi tentang struktur ringan, kuat dan cepat saat ini cukup relatif, seperti misalnya dengan adanya perkembangan teknologi beton yang maju, seperti *pretensioned*, maka istilah itu dapat menimbulkan diskusi yang ramai. Tetapi bila diperlukan yang terbukti ringan dan cepat dibangun, maka struktur baja merupakan pembanding penting yang tidak dapat diabaikan. Apalagi jika pembangunannya dilaksanakan di tempat terpencil sehingga perlu suatu pengangkutan yang khusus.

Pada kasus tertentu kadang ada alasan yang tidak bisa diganggu-gugat, karena persyaratan kekuatan tanah di lokasi yang akan dibangun yang mensyaratkan hal itu, misalnya karena dibangun di tepian lereng yang terjal, maka mau tidak mau konstruksi baja yang relatif ringan menjadi pilihan, misalnya proyek milik Universitas California San Fransisco.

Gambar 13. RMB - Universitas California San Fransisco *(MSC 2010)*

4.6. Bangunan arsitektur yang berkesan ringan dan transparan.

Berbicara tentang bangunan konstruksi, khususnya tentang bangunan jembatan dan apalagi bangunan gedung. Kadang-kadang aspek penampilan atau arsitekturalnya bahkan menjadi sesuatu yang penting dan dominan untuk menjadi pertimbangan. Jadi perencanaan bangunan tidak hanya memikirkan segi keamanan atau agar dapat berfungsi dengan baik, tetapi juga agar dapat dinikmati oleh orang banyak dan menimbulkan rasa senang atau kebanggaan.

Itu semua umumnya menjadi kerja seorang arsitek, yang karenanya secara awam kita akan mengenal adanya elemen struktur (tanggung jawab insinyur) dan elemen non-struktur atau *finishing* (dianggap tanggung jawab arsitek). Bahkan ada yang beranggapan secara mudah, bahwa elemen struktur itu tidak penting bagi awam karena nanti tidak terlihat karena dapat dibungkus oleh elemen non-struktur (*finishing*). Itulah yang memberi kesan keindahan.

Kadang kala dijumpai juga bangunan yang tidak bisa dipisahkan antara elemen struktur dan elemen bungkusnya. Dalam hal ini, keindahannya dihasilkan dari elemen struktur itu sendiri, contoh klasiknya adalah menara Eifel. Kecuali sifat monumental seperti menara tersebut, saat ini juga populer dan banyak dikembangkan bangunan ramah lingkungan, tidak ditinjau dari sisi energi, tetapi dari keberadaannya, yaitu tetap berfungsi tetapi tidak mengganggu pemandangan lingkungannya. Kalaupun terlihat nyata maka diharapkan dapat menyatu dan bahkan menjadi penunjang keindahan lingkungan tersebut.

Salah satu konsep yang ditawarkan adalah sistem struktur ringan dan transparan. Idenya berkembang di Jerman khususnya di Uni Stuttgart oleh prof Frei Otto dengan *Institute für Leichtbau* (Institut of Lightweight Structures) dan prof Jörg Schlaich dengan *Institut für Tragwerksentwurf und Konstruktion* (Institute of Conceptual and Structural Design), kedua-nya sekarang telah pensiun. Penerusnya adalah prof Werner Sobek dengan *Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren* (ILEK). Karya-karya beliau banyak memanfaatkan material glass yang memang bersifat transparan, dan digabungkan dengan material baja yang relatif langsing sehingga berkesan ringan tetapi kuat dan kaku, serta daktail.

Gambar 14. Bangunan Arsitektur berkesan Ringan dan Transparan *(http://www.wernersobek.com)*

5. PERENCANAAN UMUM

5.1. Sistem sambungan dan perilaku khas struktur baja

Perilaku struktur baja dibandingkan dengan struktur beton bertulang mempunyai perbedaan yang khas. Struktur beton bertulang cenderung menghasilkan konstruksi monolit, karena elemen-elemen strukturnya dapat dianggap menyatu, khususnya jika dilakukan pengecoran di tempat (*cast in situ*). Detail sambungan penulangan beton bertulang *cast-in-situ* bukan sesuatu yang istimewa, paling hanya memperhatikan kerapatan tulangan agar betonnya dapat mengisi sempurna. Karena sifatnya yang menerus umumnya menjadi struktur statis tak tentu.

Kondisi berbeda terjadi di struktur baja, yang tersusun dari profil-profil baja buatan pabrik dengan ukuran-ukuran tertentu, sedangkan sistem sambungannya harus disiapkan tersendiri. Masalahnya ada pada sistem sambungan tersebut, yang terdiri dari berbagai **macam bentuk** dan berbagai **macam cara pemasangan**, meskipun alat sambungnya sendiri hanya ada dua, yaitu sistem las dan sistem baut mutu tinggi.

Secara teoritis, sistem las mampu menghasilkan sambungan monolit, tapi pelaksanaannya perlu kontrol mutu ketat, yang umumnya hanya dapat diberikan jika dikerjakan di bengkel fabrikasi, bukan di lapangan. Karena untuk itu akan digunakan sistem baut mutu tinggi.

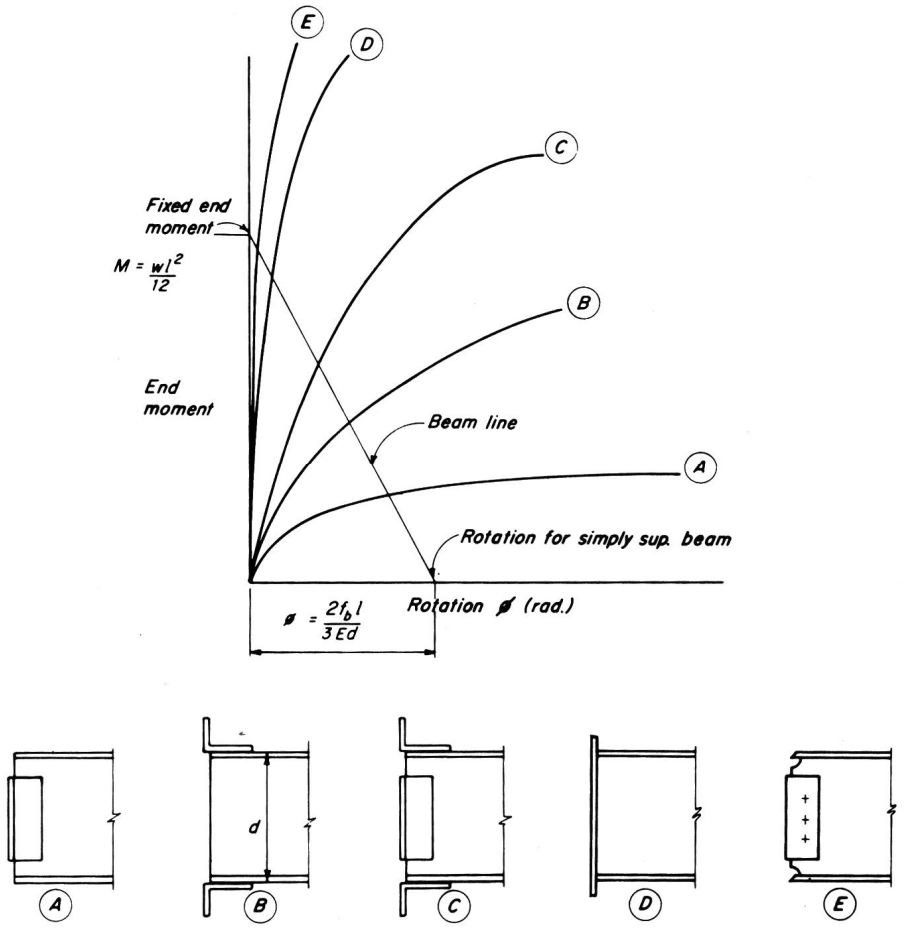
Jadi suatu perencanaan struktur yang baik adalah jika mampu menghasilkan modul-modul struktur yang disiapkan di bengkel fabrikasi dengan sistem sambungan las yang berkualitas, berukuran tertentu sesuai ketersediaan alat transportasi untuk mengangkutnya ke lapangan, dan akhirnya merangkaikan modul-modul tersebut menjadi struktur utuh sebenarnya dengan sistem sambungan baut mutu tinggi. **Ukuran modul-modul struktur** ditentukan oleh sistem **transportasi** dan juga **kapasitas *crane*** (alat angkat) di lapangan.

Adanya sistem kerja mulai dari perencanaan dan pelaksanaan yang terintegrasi itulah yang menyebabkan kontraktor pelaksana baja harus mempunyai s.d.m terlatih dan sarana kerja yang khusus pula. Itulah yang menyebabkan mengapa kontraktor baja jumlahnya relatif lebih sedikit dibanding kontraktor beton. Karena s.d.m terlatih dan sarana kerja khusus merupakan modal kerja yang tidak murah, maka sekali sukses jadi kontraktor baja, maka biasanya akan *keterusan* menerima pekerjaan itu-itu saja. Orang menyebutnya sebagai kontraktor spesialis baja. Oleh karena itu satu langkah pertama yang penting agar pekerjaan konstruksi bangunan baja sukses adalah memilih kontraktor spesialis baja yang sesuai. Meskipun perencanaannya baik, tetapi jika dikerjakan kontraktor umum, yang tidak biasa dengan baja, maka dipastikan hasilnya pasti tidak menentu, sangat beresiko dan sebaiknya perlu dipikirkan masak-masak.

Berbagai macam bentuk sambungan baja, umumnya ditentukan oleh cara pemasangannya yang ditentukan oleh kondisi lapangan. Pemakaian sistem baut mutu tinggi juga agar kualitas pelaksanaan sambungan antara prediksi (rencana) sama dengan fakta hasil di lapangan.

Sistem sambungan dengan baut, meskipun baut mutu tinggi tidak mudah menghasilkan sambungan monolit. Berbagai macam bentuk sambungan akan memberikan perilaku mekanik yang berbeda pula, dan itu akan mempengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan. Dalam perencanaan, pemilihan bentuk sambungan sangat penting, pada tahap itu harus sudah ada pemikiran atau kompromi antara kepentingan pelaksanaan, perilaku kinerja strukturnya dan biaya yang mungkin mengikutinya. Karena jika itu tidak mulai dipikirkan sejak perencanaan, maka dalam pelaksanaannya, ketika kontraktor sulit mengaplikasikannya maka bisa-bisa saja dilakukan perubahan sistem, meskipun mungkin dari segi biaya tidak ada perubahan tetapi perilaku sistem strukturnya berubah, dan itu memberikan resiko yang perlu diantisipasi.

Perilaku mekanik sistem sambungan terlihat jelas dari kurva momen-rotasi pada Gambar 15 yang meninjau berbagai bentuk sambungan, mulai [a] siku di badan (*web*); [b] siku di sayap (*flange*); [c] siku di badan dan sayap; [d] *end-plate*; [e] las di sayap dan baut di badan.



Gambar 15. Perilaku M-ϕ Sambungan *(AISC 1992)*

Sambungan paling kaku, mampu menahan rotasi paling tinggi, adalah tipe [e] memakai las, sekaligus bukti bahwa sambungan monolit akan berkemampuan lebih baik. Sambungan tipe [a] kurang kaku. Jadi hanya untuk menahan geser saja, biasa dipilih karena sederhana, murah dan mudah pemasangannya. Sambungan momen tipe [d] dan [e] dipilih jika dikendaki sistem struktur, relatif lebih mahal dan ketat dalam hal pemasangannya. Sambungan momen tentu juga dapat menahan gaya geser. Pemilihan sistem sambungan menentukan kompleks tidaknya konstruksi baja yang akan dibuat. Oleh karena itu perencana cenderung memilih sistem struktur statis tertentu yang sederhana, dan jika memerlukan suatu sistem penahan lateral khusus maka biasanya dibuat sistem terpisah, sehingga kalaupun terpaksa perlu dibuat suatu sistem struktur yang kompleks (rumit) maka jumlahnya bisa dilokalisir (minimalis).

Konstruksi baja adalah khas, yaitu dipergunakannya sistem sambungan untuk menyatukan modul-modul struktur yang telah dipersiapkan terlebih dulu. Sehingga waktu pelaksanaan di lapangan menjadi relatif **cepat**. Sangat cocok untuk membangun suatu konstruksi berat tetapi waktunya singkat, seperti jembatan darurat misalnya. Karena relatif ringan juga sangat cocok dipakai untuk proyek-proyek di daerah **pedalaman**, karena lebih mudah pengangkutannya.

Selain itu, konstruksi baja yang tua tetapi masih baik dan sudah tidak cocok digunakan lagi maka **dapat dibongkar dan dipindahkan** ke tempat lain yang masih diperlukan. Elemen struktur bangunan tua hasil bongkaran jika diproses dan dilapisi cat yang baru kadang sukar untuk dibedakan dari elemen struktur yang baru dari pabrik. Tentu saja sebelum dilakukan bongkar-pasang ada baiknya dievaluasi mutu bahan material dan rencana beban yang akan diberikan agar kinerjanya nanti juga dapat memuaskan.

5.2. Standar / Code / peraturan perencanaan bangunan baja di Indonesia

Code atau standar perencanaan struktur baja yang berlaku di suatu negara adalah sangat penting karena menjadi rujukan formal yang berkekuatan hukum untuk menentukan apakah suatu perencanaan telah memenuhi persyaratan untuk dilaksanakan atau tidak. Kesesuaian terhadap *code* (tentu jika interprestasinya benar) merupakan argumentasi kuat agar terhindar dari klaim ketika suatu bangunan mengalami kegagalan, sehingga tuduhan tidak mengarah pada perencananya, tetapi kepada hal-hal lain atau akhirnya dapat disebut sebagai musibah.

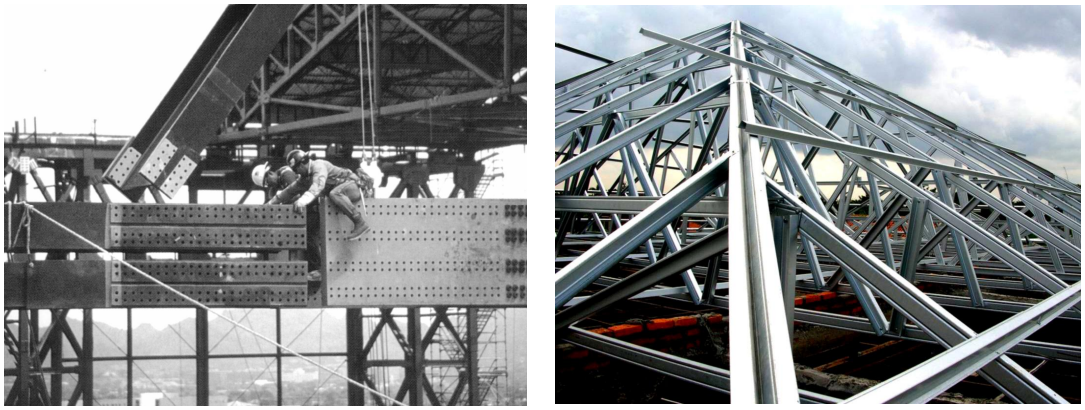
Kriteria perencanaan struktur suatu negara bisa sama atau berbeda, tergantung ketersediaan sumber dayanya, adanya kebijakan lain yang berbeda, misalnya pembatasan untuk hal-hal tertentu untuk alasan tertentu pula, seperti menjaga kelestarian lingkungan hidup atau adanya ketentuan masyarakatnya yang lebih ketat. Bahkan bisa juga dikarenakan alasan non-teknis, seperti misalnya agar suatu negara terlihat lebih mandiri dan tidak tergantung negara lain. Oleh sebab itu umumnya tiap-tiap negara mengeluarkan *code*-nya masing-masing, baik dengan cara mandiri berdasarkan hasil risetnya sendiri, menerjemahkan atau hasil kompilasi dengan cara memilah, membandingkan dan menggabungkan berdasarkan materi *code* negara lain yang dianggap unggul dan sesuai. Standar atau *code* di Indonesia khususnya struktur baja disusun berdasarkan metode yang terakhir tersebut, ada beberapa yang mirip dengan *code* luar tetapi tidak secara keseluruhan.

Mempelajari *code* perencanaan struktur baja dari beberapa negara di dunia (lihat Tabel 2), diketahui bahwa struktur baja dapat dibagi menjadi dua tipe berdasarkan cara profil dibuat : [1] baja *hot-rolled* dan [2] baja *cold-formed* (Gambar 16). Adanya perbedaan *code* menunjukkan bahwa karakter keduanya berbeda. Itu berarti kompetensi keahlian di bidang struktur baja *hot-rolled* belum tentu berlaku jika yang dipakai adalah profil baja *cold-formed*.

Tabel 2. Standar Perencanaan Baja di Berbagai Negara *(Dewobroto et. al 2006).*

Negara	Profil baja ***hot-rolled*** (canai panas)	Profil baja ***cold-formed*** (canai dingin)
Amerika (USA)	ANSI/AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, June 22, 2010	S100-07KIT 2007 Edition: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members; and 2007 Edition: Commentary on the Specification
Australia	AS4100-1998 Steel Structures, Standards Australia	AS/NZS 4600:2005 Cold-formed steel structures
Canada	S16-09 - Design of steel structures Publicaton Year : 2009	CAN/CSA-S136-07 - North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members
China	Steel Design Per GBJ 17- 88 (1988)	“Technical Standard for Thin-Walled Steel Structures”, GBJ 88, Beijing, People’s Republic of China, 1988
British / Eropa	EUROCODE 3 , PART 1-1 , BS EN 1993-1-1 Design of steel structures – General rules and rules for buildings (Published on 31/12/2008)	EUROCODE 3 , PART 1-3 , BS EN 1993-1-3 General – Cold formed thin gauge members and sheeting (Published on 28/02/2009)
Indonesia	SNI 03 - 1729 - 2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung, Departemen Pekerjaan Umum	Belum ada !
Jerman	DIN EN 1993-1-1 (2010-12) Eurocode 3: Design Of Steel Structures - Part 1-1: General Rules And Rules For Buildings	DIN V ENV 1993-1-3, versi Jerman Eurocode
Jepang	Japanese Architectural Standard Specification JASS 6 (1996) Structural Steelwork Specification for Building Construction	Architectural Institute of Japan: “Recommendations for the Design and Fabrication of Light Weight Steel Structure”, 1985

Catatan : judul mungkin sudah ada yang *out-of dated*



a). Struktur dengan profil baja Hot-Rolled *b). Struktur dengan profil baja Cold-formed*

Gambar 16. Konstruksi baja berdasarkan profil penyusunnya *(Dewobroto et. al. 2006)*

SNI 03 – 1729 – 2002 "*Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*" merupakan *code* atau standar perencanaan konstruksi baja terkini di Indonesia. Tetapi jika dibandingkan dengan negara industri maju maka jelas sudah terlihat *out-of-dated*. Standar tersebut juga belum memasukkan strategi perencanaan baja *cold-formed*, sehingga hanya bisa digunakan untuk perencanaan struktur dengan profil baja *hot-roll* (canai panas) saja.

Bagaimanapun, pemakaian baja *cold-formed* berbeda perlakuannya dibanding baja *hot-rolled* (Wei-Wen Yu 2000, Dewobroto et. al 2006). Meskipun ringan sehingga baja *cold-formed* disebut juga baja ringan, tetapi perilaku bahan dan keruntuhannya relatif lebih kompleks, sehingga resiko kegagalan akan lebih tinggi bila digunakan konfigurasi struktur yang tidak biasa digunakan sebelumnya. Tentang hal itu banyak negara-negara lain yang memahami sehingga dibuatkan peraturan perencanaan yang berbeda (lihat Tabel 2).

Sebagai kelompok yang sama dalam sistem struktur dinding tipis maka baja *cold-formed* mempunyai kekhususan dalam perencanaannya, yaitu pengaruh bentuk geometri penampang sangat besar terhadap perilaku dan kekuatannya dalam memikul beban. Adanya perubahan bentuk yang sedikit saja dari penampangnya maka kekuatan elemen struktur akan berbeda sama sekali termasuk perilaku tekuknya. Pemberian sedikit tekukan pada profil sehingga menjadi penampang *corrugated* maka kinerjanya mengalami peningkatan yang signifikan dibanding perilaku penampang pelat datar.

Kekhususan tersebut mengakibatkan proses perencanaannya relatif lebih rumit dibanding proses perencanaan baja *hot-rolled*. Tetapi karena keuntungannya lebih besar, misalnya (1) kemudahan fabrikasi, (2) rasio kuat/berat yang relatif tinggi, dan (3) sesuai untuk berbagai aplikasi, maka konstruksi baja *cold-formed* tetap populer. Di Inggris diketahui jika industri konstruksinya dapat menghabiskan sekitar 300,000 ton komponen baja *cold-formed* setiap tahunnya dan selanjutnya memperlihatkan pertumbuhan meningkat (Dewobroto et.al 2006).

Popularitas baja ringan diam-diam berimbas juga di Indonesia, bahkan perusahaan Australia (PT. BHP Steel Lysaght) ternyata sudah beroperasi sejak tahun 1973 dan sampai sekarang tetap eksis bahkan berkembang maju. Oleh karena itulah jika diperhatikan, dalam promosi produk atap baja ringan yang banyak terdapat pada iklan-iklan surat kabar atau majalah pada umumnya memakai produk berlisensi BHP. Akhir-akhir ini, promosinya semakin gencar khususnya setelah material kayu yang berkualitas harganya mahal dan juga semakin langka.

Di Indonesia karena tidak ada *code* baja *cold-formed*, tidak ada kewajiban memasukkannya sebagai kurikulum pendidikan insinyur, sehingga banyak yang tidak menguasai perencanaan dan pelaksanaannya. Tetapi para *cost-estimator* umumnya menunjukkan kepada *owner* bahwa produk tersebut lebih efektif antara biaya dan kinerjanya (dibanding kayu) sehingga pemilik investasi (proyek) meminta untuk memakai produk *cold-formed* tersebut.

Menghadapi kondisi seperti itu, umumnya para insinyur yang ada bilamana berkaitan dengan *cold-formed* akan menyerahkan bulat-bulat mulai dari perencanaan sampai pelaksanaannya pada kontraktor spesialis yang umumnya sekaligus pemasok material tersebut. Kelihatannya memang praktis, tetapi itu menunjukkan bahwa para insinyur tersebut belum mandiri dalam menentukan perencanaan sistem struktur dan masih tergantung dengan pihak lain. Kondisi tersebut dapat juga diungkapkan dengan kata lain yang mungkin tidak enak untuk didengar yaitu belum adanya kompetensi rekayasa berkaitan dengan pembangunan konstruksi baja ringan di Indonesia. Dengan demikian pasar di Indonesia untuk konstruksi baja ringan hanya menjadi objek pemasaran bagi produsen dan insinyur luar negeri yang lebih terbiasa, khususnya dari negara-negara yang mempunyai *code* tentang baja *cold-formed*.

Bagaimana dengan *code* perencanaan untuk baja *hot-rolled*, yaitu SNI 03 – 1729 – 2002.

Code perencanaan baja setebal ± 215 halaman tersebut, selanjutnya kita sebut sebagai SNI, ternyata mencakup materi yang luas. Bayangkan saja, pada buku tersebut sudah mencakup perencanaan baja secara umum dan juga sekaligus persyaratan untuk bangunan baja tahan gempa. Selanjutnya jika dibandingkan dengan *code* negara lain, yaitu AISC (2010) yang tebalnya 612 halaman atau hampir 3 kali dari *code* SNI baja Indonesia, ternyata itupun belum memasukkan materi untuk bangunan tahan gempa (terdapat pada buku lain terpisah).

Apa artinya itu. Ada yang berpendapat bahwa apa yang disajikan di SNI adalah inti sari dan yang benar-benar diperlukan saja, mungkin demi pertimbangan agar lebih fokus dan mudah dipelajari. Tetapi bagi insinyur yang ingin serius mendalami struktur baja, ternyata memakai rujukan SNI cukup menyulitkan. Ada beberapa hal yang diungkapkan tidak secara detail atau bahkan tidak tercakup sama sekali. Masalah sebenarnya bisa langsung selesai dengan cara berpindah kepada *code* sejenis yang lebih lengkap seperti AISC (2010). Tetapi karena rasa nasionalisme, cinta produk sendiri, maka dicoba untuk merunut ulang berdasarkan daftar acuan yang digunakan. Ternyata ini tidak menyelesaikan masalah juga, karena di SNI tadi tidak terdapat daftar rujukan pustaka yang digunakan, bahkan daftar nama penyusunnya saja anonim. Berarti tidak diketahui juga pakar-pakar yang terlibat dan bertanggung jawab dalam penyusunan SNI tersebut. Mengherankan sekali, cara kerja yang tidak biasa dilakukan oleh para ilmuwan terpelajar ketika menyusun kajian akademis.

Dengan adanya kondisi di atas, penulis berpendapat bahwa standar perencanaan struktur baja yang mengacu SNI 03 – 1729 – 2002, sifatnya seperti antara ada dan tiada, tidak signifikan pengaruhnya. Masih dianggap sebagai formalitas belaka pada proses perencanaan struktur baja, karena kalaupun ada yang tidak lengkap maka akan digunakan *code* yang lengkap dari negara lain. Langkah ini tentunya dilakukan insinyur yang ingin tetap memakai produk baja, sedangkan yang lain karena tidak puas, maka daripada mengeluh tanpa ada penyelesaiannya akan langsung mengalihkan perencanaannya dari struktur baja ke struktur beton bertulang, yang dianggap relatif mudah mempelajarinya apalagi didukung oleh *code* yang lebih jelas.

SNI beton SK SNI 03 - xxxx – 2002 dari BSN, tidak secara jelas mencantumkan rujukan pustaka, tetapi Acuan Normatif menyebutkan beberapa standar Amerika (ASTM dan ANSI). Bahkan versi SNI beton yang lain, SNI 03-2847-2002 yang diperbanyak oleh JTS ITB dalam prakatanya jelas menyebutkan acuan yang dipakai, yaitu ACI 318M-99 dan ACI 318-02, juga ada daftar nama pakar team penyusun yang terlibat. Jadi saat dibandingkan dengan *code* USA (ACI 318M) ternyata banyak kemiripannya. Dengan demikian *code* SNI beton dapat dipelajari lebih mudah berdasarkan buku-buku yang mengacu pada *code* ACI 318M tersebut. Itulah mengapa kompetensi tentang beton relatif banyak yang menguasai.

Standar SNI baja yang dibahas terbatas pada bangunan gedung. Jadi untuk meningkatkan penggunaan konstruksi baja untuk bangunan gedung perlu perbaikan standar perencanaan struktur baja yang ada (khusus untuk profil baja *hot-rolled*), maupun profil baja *cold-formed* yang belum tersedia.

Bagaimana dengan penggunaan material baja untuk konstruksi bangunan jembatan.

Situasinya ternyata berbeda, penyebabnya adalah UU Republik Indonesia No.38 Tahun 2004 tentang JALAN. Adapun yang dimaksud konstruksi jalan adalah termasuk juga jembatan atau bangunan sarana-sarana lainnya. Pada pada Pasal 13 UU disebutkan bahwa :

(1) Penguasaan atas jalan ada pada negara.

(2) Penguasaan oleh negara sebagaimana dimaksud pada ayat (1) memberi wewenang kepada Pemerintah dan Pemerintah Daerah untuk melaksanakan penyelenggaraan jalan.

Bentuk penyelenggaraan jalan terdiri dari pengaturan, pembinaan, pembangunan, dan pengawasan. Pelaksananya ada di bawah koordinasi Kementrian Pekerjaan Umum, melalui Direktorat Jenderal Bina Marga, adapun pelaksana teknis adalah Direktorat Bina Teknik.

Jadi yang membedakan pada proyek bangunan jembatan adalah adanya kebijaksanaan satu pintu, dimana pemerintah dalam hal ini Kementrian Pekerjaan Umum menjadi pemilik, perencana, sekaligus pengawas proyek, sedangkan pihak luar berperan sebagai pelaksana. Suatu peran beresiko untuk terjadinya suatu manipulasi (korupsi), tetapi karena ini masalah teknis yang mempunyai aturan jelas dan logis sehingga kalaupun ada penyimpangan maka akhirnya nanti dipastikan akan ketahuan juga. Karena kalau sampai terjadi masalah maka hal itu pasti akan kembali ke mereka juga. Dengan argumentasi seperti itulah maka mereka yang terlibat di dalamnya, mau tidak mau harus bersikap profesional.

Semangat itulah ditambah adanya bantuan teknis dari luar negeri maka bidang perencanaan jembatan juga terjadi peningkatan kualitas. Tahun 1989 – 1992, yaitu saat mendapat bantuan pembangunan jembatan dari Australia berupa rangka baja Transfield & Trans Bakrie, dapat terjalin juga kerja sama teknis dalam pembuatan peraturan perencanaan jembatan lengkap. Pada saat itu bahkan dapat dihasilkan tidak kurang 17 modul, yang dikenal sebagai **Bridge Management System (BMS-92)**. Modul yang dibuat relatif lengkap karena mencakup semua kegiatan pengelolaan jembatan, mulai dari kegiatan manajemen dan operasional jembatan termasuk prosedur-prosedur perencanaan. Manual pemakaiannya dapat menjadi petunjuk praktis memilih dan menentukan tipe konstruksi tahap *preliminary design*. Karena substansi dan pembahasannya yang luas, maka BMS-92 dapat membantu perencanaan dan pelaksanan pembangunan jembatan sampai dengan panjang bentang 200 meter.

Gambar 17. Jembatan Noelmina (tipe Transfield-Australia) - Kupang *(Sumber : L. Hidayat)*

5.3. Pengaruh pemodelan struktur dan kondisi aktual

Tahapan penting sebelum analisa struktur adalah menyiapkan model struktur, yang berupa data-data numerik dilengkapi gambar dan notasi untuk merepresentasikan variabel-variabel penting dari suatu struktur real agar dapat diproses dengan analisa struktur, baik cara manual maupun berbasis komputer. Meskipun memakai komputer berharga jutaan tetapi modelnya tidak tepat maka hasilnya juga tidak berguna. *Garbage in garbage out.*

Bila diperhatikan pada mata kuliah analisa struktur di jurusan teknik sipil level S1, tidak ada materi spesifik yang membahas pemodelan struktur. Porsi terbesar materi yang dipelajari adalah penyelesaian langkah demi langkah berdasarkan formula atau metode tertentu untuk menghitung respons gaya atau lendutan, dan menampilkannya. Adapun bentuk model sudah ditetapkan terlebih dahulu, struktur jenis tertentu maka modelnya juga jenis tertentu pula.

Penyelesaian cara klasik memang tidak memerlukan pengetahuan tentang pemodelan terlalu banyak, karena metode penyelesaiannyapun juga terbatas sehingga tidak memungkinkan ada variasi pemodelan yang lain. Umumnya untuk type struktur yang berlainan maka metode yang digunakan juga perlu disesuaikan. Intinya pada cara klasik (manual), setiap metode umumnya spesifik, jarang bersifat serba guna (*general purpose*), karena memang tujuannya adalah mendapatkan penyelesaian sederhana untuk dikerjakan manual (kalkulator).

Pada era komputer, parameter struktur yang dapat dievaluasi dapat ditingkatkan sehingga variasi pemodelannya menjadi lebih banyak. Jika sebelumnya struktur hanya ditinjau sebagai objek 2D (bidang) maka sekarang dapat dengan mudah ditinjau sebagai objek 3D (ruang).

Masalahnya adalah, apakah semakin banyak parameter atau semakin lengkap yang dianalisis maka hasilnya semakin baik. Meskipun ketelitian hasil komputer dapat dijamin, tapi jika keluarannya juga kompleks, kadang-kadang kelemahannya dari sisi manusia yaitu tidak teliti atau bingung untuk memilih mana yang paling tepat, karena akan terlihat logis semuanya. Jika demikian maka rujukan dengan data empiris menjadi satu-satunya pembanding handal.

Struktur prinsipnya bisa berbentuk apa saja, tapi dari sisi geometri dikategorikan menjadi, struktur **garis** / 1D (balok, kolom); struktur **permukaan** / 2D (pelat, dinding, cangkang); dan struktur **pejal** / solid / 3D (struktur yang umumnya ada pada bagian detail sambungan, atau yang lain, misalnya struktur angkur ujung pada elemen kabel prategang).

Program analisa struktur komersil, SAP2000 misalnya memiliki element Frame, Shell dan Solid, masing-masing dikhususkan untuk kategori struktur 1D, 2D dan 3D. Jadi jika dapat memodelkan struktur secara tepat, maka hampir sebagian besar struktur dapat dianalisis.

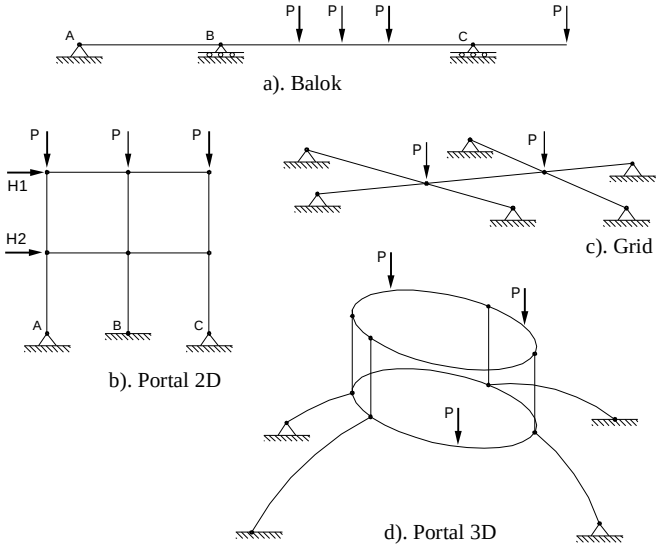
a). Struktur Garis - 1D *b). Struktur Permukaan - 2D* *c). Struktur Pejal - 3D*

Gambar 18. Kategori Struktur dari Sisi Geometri

Pada kategori di atas, struktur garis adalah yang paling sederhana, lalu struktur permukaan dan terakhir struktur pejal. Pada beberapa bagian, struktur permukaan dapat disederhanakan menjadi struktur garis, apabila pada salah satu sisinya mempunyai panjang tak terhingga,

misalnya pelat satu arah, yang mana pelat tersebut cukup ditinjau untuk tiap satuan lebar. Struktur garis dan struktur permukaan cukup populer pada bidang teknik sipil, sedangkan struktur solid jika ada umumnya perlu disederhanakan terlebih dulu. Efek penyederhanaan umumnya dengan pertimbangan bahwa yang penting aman, meskipun dari sisi material mungkin lebih banyak (belum tentu boros jika ditinjau secara keseluruhan).

Analisis yang teliti pada struktur solid umumnya bertujuan untuk mendapatkan optimasi, pemakaian bahan material sekecil mungkin asalkan keamanan masih dapat diandalkan. Optimasi umum sering dijumpai pada konteks industri pada produk berulang dan banyak, sehingga pada jumlah tertentu biaya analisis yang mahal dapat terbayarkan. Sedangkan pada proyek teknik sipil produknya spesifik, sehingga jika diperlukan analisis yang kompleks dan mahal maka harus dibandingkan dengan manfaatnya, apakah memang perlu.



Gambar 19. Pemodelan sebagai struktur garis

Dikaitkan dengan pemodelan sebagai struktur garis (1D) untuk struktur baja yang dianalisis dengan SAP (*structural analysis program*), maka perlu diperhatikan hal-hal berikut:

- **Perilaku penampang** real dan model tidak sesuai, misalnya profil U atau profil dengan *shear-centre* tidak berhimpit *neutral axis* memakai model struktur garis maka fenomena *warping* akibat beban tidak diberikan pada *shear-centre* tidak akan terdeteksi. Umumnya model struktur garis hanya cocok untuk penampang double simetri (I, H atau WF).
- **Sistem sambungan baja** banyak variasi bentuk juga perilaku mekaniknya. Susah membuat suatu sambungan monolit yang menerus, kecuali sambungan las. Pemodelan untuk SAP biasanya dianggap menerus atau di-relase (sendi). Bagaimana jika kondisi aktual adalah diantaranya (semi-rigid), jepit tidak tetapi sendi juga tidak.
- Jika digunakan baut mutu tinggi dengan sistem tumpu, **adanya slip** agar tumpu bekerja tidak mudah untuk diperhitungkan dalam analisa struktur. Jadi jangan terkecoh jika hasil analisis dengan komputer yang kesannya kecil, tapi di lapangan bisa berbeda signifikan.
- **Kondisi pertambatan lateral** untuk menjamin stabilitas batang baja yang langsing. Umumnya ini diabaikan dalam pembuatan model struktur agar model sederhana, karena umumnya diperlukan analisis ruang (3D). Ini penting untuk proses desain dengan SAP.
- **Opsi P-Δ** yang bisa digunakan untuk analisis gedung bertingkat tinggi **belum tentu bisa** mengevaluasi pengaruh **P-δ** akibat adanya **kelangsingan elemen** struktur.

5.4. Analisa struktur bangunan baja

Analisa struktur untuk perencanaan baja umumnya cukup berbasis elastik-linier biasa, yaitu untuk mendapatkan respons struktur saat dibebani, berupa gaya dan deformasi. Selanjutnya untuk desain LRFD untuk mendapatkan pembebanan ultimate (batas) maka hasil elastik-linier cukup dikalikan dengan beban terfaktor (pendekatan probabilitas / statistik).

Dari sisi bahan material, baja adalah istimewa, mempunyai rasio kuat dan berat volume yang tinggi yang mengakibatkan **ukuran penampang relatif langsing** dibanding struktur beton. Struktur langsing lebih beresiko tinggi terhadap **stabilitas** (*buckling*). Selain itu adanya sifat daktail menyebabkan material baja dapat diberdayakan sampai leleh (**kondisi plastis**) tanpa mengalami kerusakan. Jika itu diperhitungkan maka **redistribusi momen** dapat diberikan pada proses analisa struktur yang memungkinkan dihasilkan struktur yang lebih ekonomis.

Faktor-faktor di atas merupakan petunjuk bahwa analisa struktur elastik-linier saja tidak akan cukup untuk memprediksi dengan baik perilaku struktur yang berkaitan dengan stabilitas dan plastis. Sehingga insinyur perencana belum dapat secara optimal untuk mengeksplorasinya. Perlu analisa struktur yang mengatasi keterbatasan elastik linier, yaitu inelastik non-linier. Saat ini, itu sudah bukan masalah karena didukung kemajuan teknologi komputer, *software* maupun *hardware* sehingga analisa struktur inelastik non-linier dapat dipakai secara praktis.

Meskipun ada komputer yang canggih tetapi penggunaannya tidak mudah. Konsep-konsep yang biasa dikenal dalam analisa struktur elastik-linier seperti **superposisi**, kombinasi beban menjadi tidak mudah diterapkan. Tetapi jika dapat memanfaatkan secara baik maka analisa struktur inelastik non-linier mampu memprediksi perilaku struktur secara lebih baik khususnya yang berkaitan dengan kekuatan, kekakuan, maupun daktilitas (perilaku keruntuhan).

Peraturan baja Amerika terbaru (AISC 2010) untuk perencanaan struktur terhadap stabilitas sudah merekomendasikan metode ***Direct Analysis***, suatu analisa struktur berbasis komputer yang sudah memperhitungkan sekaligus pengaruh geometri non-linier. Adapun metode lama, yaitu analisa elastik-linier yang kemudian dimanipulasi agar dapat memperhitungkan pengaruh stabilitas dipindahkan menjadi metode alternatif pada Appendix 7. Bentuk manipulasi stabilitas yang dimaksud adalah metode [1] *Effective Length* dan [2] *First-Order Analysis*.

Istilah di atas memang baru dan dimuat di AISC (2010). Metode *Effective Length* merupakan istilah yang merujuk tata cara desain baja lama, memakai faktor K untuk memperhitungkan panjang tekuk elemen. Adapun *First-Order Analysis* tidak merujuk istilah elastik-linier yang biasa dipahami bersama, tetapi merupakan versi sederhana metode *Direct Analysis*, memakai manipulasi matematik untuk memperhitungkan stabilitas sehingga dapat dihitung langsung sebagai bagian analisis struktur order ke-1 (Kuchenbecker et al. 2004).

Pada Appendix 8 (AISC 2010) ada *Approximate Second-Order Analysis*, suatu pendekatan sederhana dalam memperhitungkan pengaruh P-Δ dan P-δ. Ini berasal dari *code* lama yang akan dipergunakan bersama dengan Appendix 7 untuk perencanaan terhadap stabiltas.

Metode *Direct Analysis* adalah metode terbaru analisa struktur berbasis teknologi komputer yang direkomendasikan AISC (2010) untuk perencanaan struktur baja. Dalam metode tadi maka untuk memperhitungkan pengaruh stabilitas pada struktur dan komponen-komponen yang terkait (elemen dan sambungan) maka hal-hal berikut harus dipertimbangkan, yaitu [1] deformasi lentur, geser dan aksial, maupun deformasi lain yang mempengaruhi struktur; [2] *second-order effects* (P-Δ dan P-δ); [3] geometri *imperfections*; [4] reduksi kekakuan akibat in-elastisitas; dan [5] ketidak-pastian kekakuan dan kekuatan. Semua pengaruh pembebanan dihitung pada kombinasi beban LRFD yang berkesesuaian.

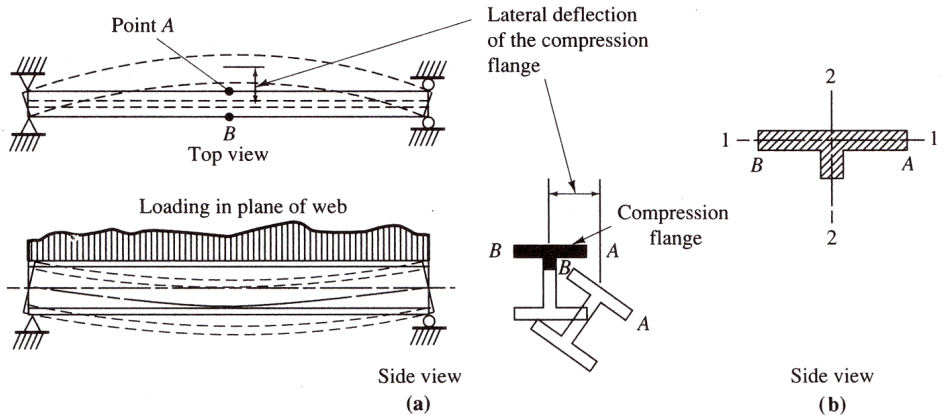
Adanya rekomendasi baru AISC (2010) memakai metode *Direct Analysis* juga menunjukkan bahwa era komputerisasi pada perencanaan baja sudah menjadi persyaratan penting.

5.5. Hati-hati desain penampang baja dengan komputer (Dewobroto 2010)

Pentingnya komputer pada perencanaan baja tidak diragukan lagi, apalagi dengan adanya metode *Direct Analysis* (AISC 2010). Adanya komputer tidak berarti semuanya jadi beres, karena seperti teknologi lainnya, jika tidak digunakan secara tepat bahkan dapat merugikan.

Tahap berikutnya setelah analisis struktur adalah **desain penampang** yang memerlukan proses *trial-and-error* sehingga agar optimal perlu memakai *software* komputer, misalnya SAP2000, ETABS (CSI 2005). *Software* tersebut telah dikenal lama dan telah dibuat opsi-opsi barunya yang menarik, seperti opsi otomatisasi data. Ternyata opsi ini pada suatu kondisi tertentu jika tidak dipahami baik akan menghasilkan keluaran yang tidak benar (salah), sehingga perlu dicermati dengan hati-hati. Untuk mengungkapkannya penulis akan merujuk penelitian terdahulu (Dewobroto 2010) meskipun masih terbatas pada proses desain penampang balok tetapi karena balok termasuk sistem struktur yang penting tetapi relatif sederhana perhitungannya maka tentunya akan lebih mudah dipahami.

Hal penting pada proses desain penampang balok baja, tetapi diabaikan pada proses analisis strukturnya adalah tentang **stabilitas**. Pada balok, stabilitas yang menentukan adalah *lateral torsional buckling* (LTB), lihat gambar di bawah.



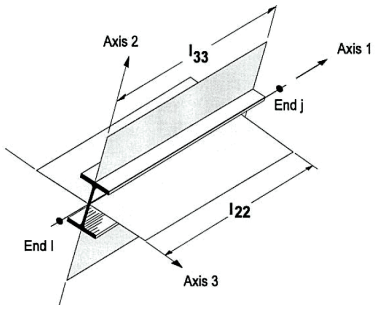
Gambar 20. LTB balok dengan pertambatan lateral di tumpuan *(Salmon et. al. 2009)*

Pada perancangan balok, insinyur harus memastikan adanya pertambatan lateral yang cukup pada bagian desaknya, bisa *cross-frame* atau diaphragma khusus (Segui 2007). Cara lain sayap profil balok disatukan ke lantai memakai *steel deck* yang di las, meskipun mengukur efektifitas pertambatan lateralnya memerlukan *engineering judgement* (McCormac 2008).

Jika pemodelan strukturnya belum memperhitungkan pertambatan lateral (*cross-frame* atau *diaphragma*), maka data lokasi pertambatan lateral untuk desain penampang perlu diberikan. Ini umumnya yang terjadi pada proses desain yang sudah-sudah. Ternyata saat ini proses desain penampang dapat berlangsung tanpa data tambahaan, tetapi memakai data analisis struktur sebelumnya. Ini terjadi karena opsi *design-preference* (CSI 2007) yang akan bekerja otomatis, sehingga membuat SAP2000 atau ETABS terkesan lebih *user-friendly* dan praktis.

Adanya proses langsung dari tahap analisa-struktur ke tahap desain-penampang tanpa ada data baru membuat kesan bahwa kedua tahapan tersebut seakan-akan menyatu, tidak ada bedanya. Padahal keduanya itu sebenarnya dua hal yang berbeda, ditinjau dari tujuan atau strategi pelaksanaannya. Kalaupun bisa dianggap menyatu maka tentu ada penghubungnya. Jika itu benar maka penghubung yang dimaksud tentunya hanya benar pada suatu batasan tertentu. Dari ketentuan desain baku (AISC 2010) penghubung yang dimaksud umumnya disusun dari fakta empiris yang diolah berdasarkan kriteria statistik, bahkan ada yang berupa kesepakatan bersama berdasarkan *engineering judgement* saja.

Mari dibayangkan, agar prosesnya menyatu (*seamlessly*) akibat adanya fasilitas otomatis maka diperlukan kode program. Saat penulisan kode program, bisa saja terjadi bahwa kode langkah-langkah yang disiapkan *programmer* tidak bekerja dengan baik karena input data pemakai tidak sesuai. Ketidaksesuaian akibat **adanya variasi pemodelan struktur yang beragam**, juga akibat faktor *engineering judgement* yang subyektif. Masalahnya **timbul jika kekurangan data-data tadi langsung diambil-alih oleh *default design settings*** yang menanganinya otomatis. Kondisi seperti ini umumnya dapat diatasi jika insinyur waspada dan mengetahui potensi-potensi yang dapat menyebabkan kondisi buruk itu terjadi.

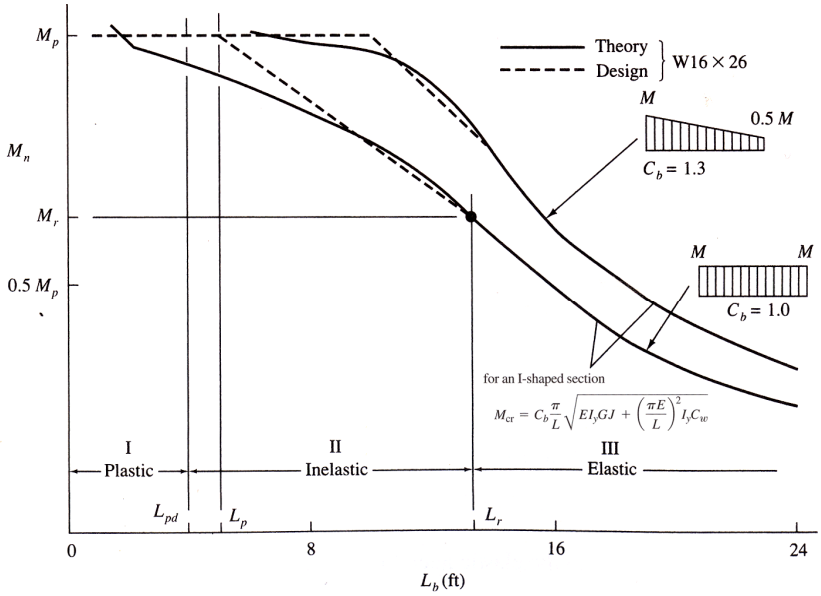


Gambar 21. Jarak Bebas Tidak Tertambat L_b dan kaitannya dengan L_{33} and L_{22} *(CSI 2007)*

Pada balok baja, parameter yang berkaitan dengan LTB adalah L_b atau jarak bersih tanpa pertambatan lateral. Manual program (CSI 2007) menyatakan (**Kutipan-1**) :

> *In determining the values for L_{22} and L_{33} of the members, the program **recognizes various aspects** of the structure that have an effect on these lengths, such as member connectivity, diaphragm constraints and support points. **The program automatically** locates the member support points and **evaluates** the corresponding **unsupported length**.*
> . . .
>
> *By default, the unsupported length for lateral-torsional buckling, L_b, is taken to be **equal to** the L_{22} factor.*

Apakah itu berarti SAP2000 dapat secara otomatis menentukan L_b, tanpa perlu data baru. Bagaimanapun L_b dan C_b penting karena menentukan kekuatan lentur balok (Gambar 22). Jika dapat otomatis, bagaimana cara program menentukan berdasarkan model strukturnya.



Gambar 22. Pengaruh L_b dan C_b terhadap Kuat Lentur Balok Baja *(Salmon et. al. 2009)*

Padahal menentukan kondisi pertambatan lateralnya memadai atau tidak, masih memerlukan *engineering judgement* (McCormac 2008) yang bersifat subyektif. Manual (CSI 2007) tidak memberi penjelasan, meskipun ada petunjuk (**Kutipan-2**):

> *The preferred method is to model a beam, column or brace member as **one single element**. . . . If the member is manually **meshed (broken) into segments**, maintaining **the integrity of the design algorithm becomes difficult.***

Dari kutipan di atas, tersirat bahwa algoritma program juga mempunyai keterbatasan. Ada ketentuan khusus yang harus dipahami dan diikuti, dimulai dari pemodelan struktur untuk analisis sampai desain agar prosesnya dapat berlangsung *seamlessly*.

Tiga kasus perancangan balok baja (Mc Cormac 2008; Vinnakota 2006; Salmon et.al 2009) telah dianalisis dan didesain ulang dengan SAP2000 dan ETABS (Dewobroto 2010). Pada tahap analisis hasilnya relatif sama, tetapi tahap desain otomatis, ternyata beberapa hasilnya tidak memuaskan, berbeda dengan desain acuan. Itu menunjukkan bahwa opsi otomatis program mempunyai keterbatasan dalam memproses data-data suatu model struktur, yang variasinya relatif cukup banyak, bahkan dapat disebut tidak terbatas.

Agar desain penampang yang memakai opsi otomatis hasilnya benar dan optimal, insinyur harus menyiapkan model struktur sesuai karakter programnya, dalam hal ini SAP2000 dan ETABS. Keduanya adalah *structural analysis program* (SAP) buatan CSI Inc., Berkeley, (www.csiberkeley.com), yang dibuat untuk pasar berbeda. SAP2000 adalah *general purpose* SAP, sedangkan ETABS ditujukan pada perancangan bangunan gedung (2D atau 3D). Jadi wajar saja jika keduanya mempunyai karakter program berbeda. Itu sebabnya, CSI menjual keduanya secara terpisah dan bukan dengan menggabungkannya. Penelitian membuktikan bahwa karakter program tidak mempengaruhi proses analisis, tetapi hanya hasil desain.

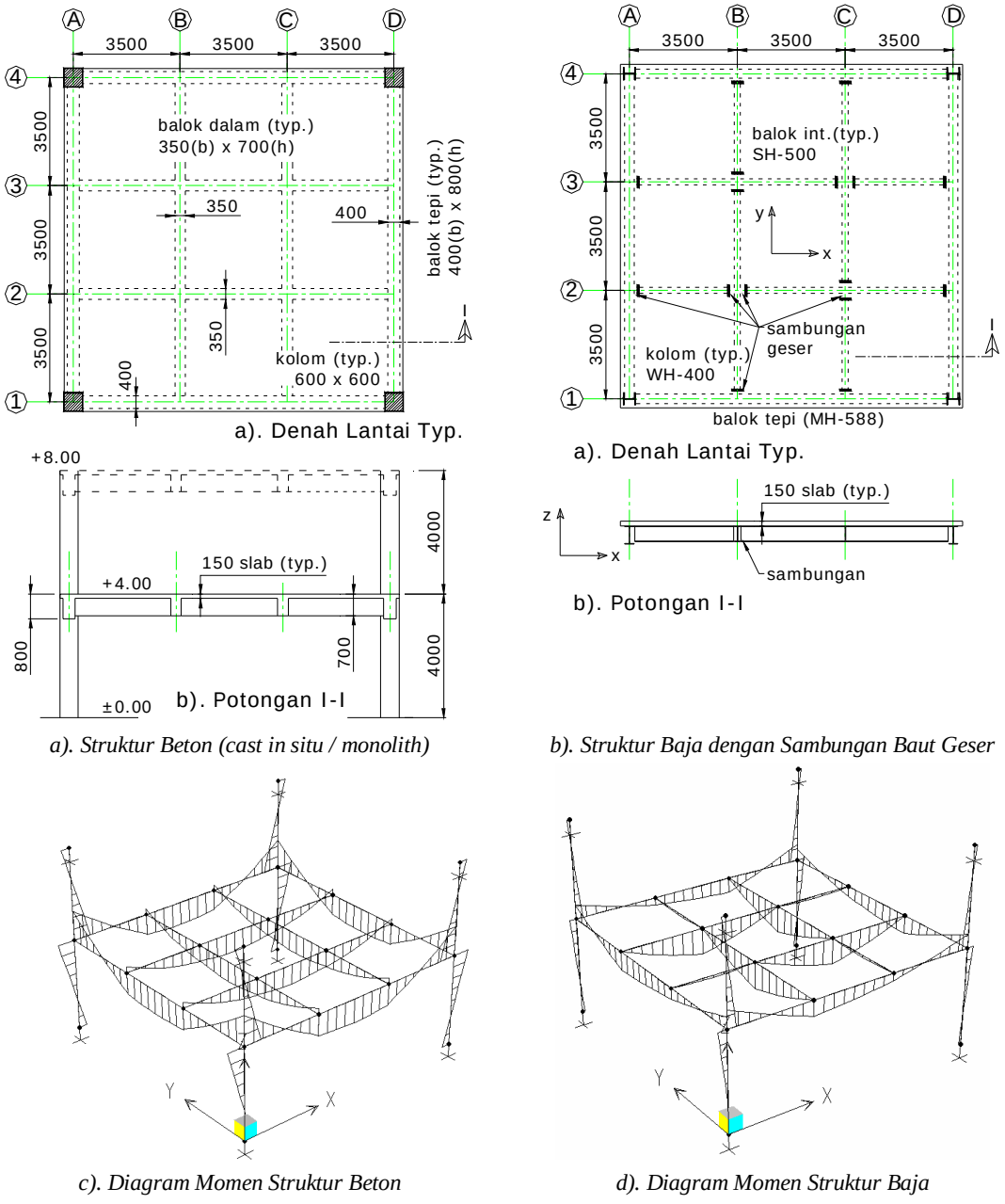
Adanya buku manual yang sama (CSI 2007), tetapi karakter programnya berbeda merupakan petunjuk bahwa untuk mengenal karakter suatu program tidak cukup hanya membaca buku manualnya saja, tetapi perlu pengalaman langsung dengan program itu sendiri. Salah satu contoh sederhananya adalah karena program ETABS dimaksudkan untuk bangunan gedung maka yang namanya profil baja untuk BALOK pasti dianggap menyatu dengan lantainya. Anggapan ini menyebabkan nilai L_b dipastikan kecil atau dianggap tidak terjadi LTB. Sedangkan program SAP2000 karena dimaksudkan untuk struktur yang lebih umum, dan tidak terbatas pada bangunan gedung maka tidak ada yang namanya balok, adanya hanya elemen struktur saja, tidak berbeda dengan yang lain, kecuali orientasinya yang horizontal.

Ada tiga kasus perancangan yang ditinjau, problemnya relatif sederhana, yaitu perancangan balok baja menurut AISC LRFD. Oleh karenanya dapat diketahui bahwa parameter desain yang belum terdapat pada proses analisis adalah parameter L_b dan C_b. Masing-masing adalah jarak bebas tanpa pertambatan lateral (l_{22} pada Gambar 21) dan faktor momen gradien. Pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kekuatan lentur balok diperlihatkan pada kurva di Gambar 22. Sedangkan penjelasannya secara lengkap dapat dibaca pada buku teks baja standar (Vinnakota 2006, McCormac 2008, dan Salmon 2009). Mempelajari studi kasus, khusus pada parameter tadi maka disimpulkan bahwa penyebab perbedaan hasil SAP2000 dan ETABS terhadap hasil desain acuan adalah bersumber dari bagaimana cara program memproses input-data tahap analisis untuk menghasilkan L_b dan C_b yang merupakan input-data pada tahap desain penampang.

Adanya kasus yang dapat dikemukakan ini juga menunjukkan bahwa pada prinsipnya meskipun sudah ada program komputer canggih dengan opsi otomatis sekalipun ternyata tidak dapat digunakan dengan baik tanpa insinyur pemakai program memahami benar tentang proses perancangan struktur baja. Bagaimanapun juga program komputer hanyalah alat bantu sedangkan keputusan akhir tetap di tangan insinyur perencananya.

5.6. Pentingnya konsistensi perencanaan dan pelaksanaan

Insinyur umumnya mengandalkan program komputer komersil untuk perencanaan struktur, lebih praktis, cepat dan terbukti banyak yang telah sukses memakainya. Umumnya program komersil seperti itu mempunyai fasilitas canggih dan para awam berpendapat bahwa semakin canggih suatu analisis maka hasilnya juga akan semakin mendekati realita (≈ teliti). Sebagai contoh adalah fasilitas analisa struktur 3D (ruang). Sekarang hampir sebagian besar program analisa struktur komersil mempunyai kemampuan 3D. Kondisi itu didukung oleh adanya program CAD yang menyebabkan pembuatan gambar 3D atau 2D hampir sama mudahnya. Oleh karena itu timbul pendapat bahwa sebaiknya semua analisa strukturnya harus 3D saja sekalian. Jika itu dikerjakan maka diyakini model yang dipilih akan lebih mendekati bentuk sebenarnya sehingga hasilnya tentu akan lebih teliti. Apakah benar demikian.



a). Struktur Beton (cast in situ / monolith)

b). Struktur Baja dengan Sambungan Baut Geser

c). Diagram Momen Struktur Beton

d). Diagram Momen Struktur Baja

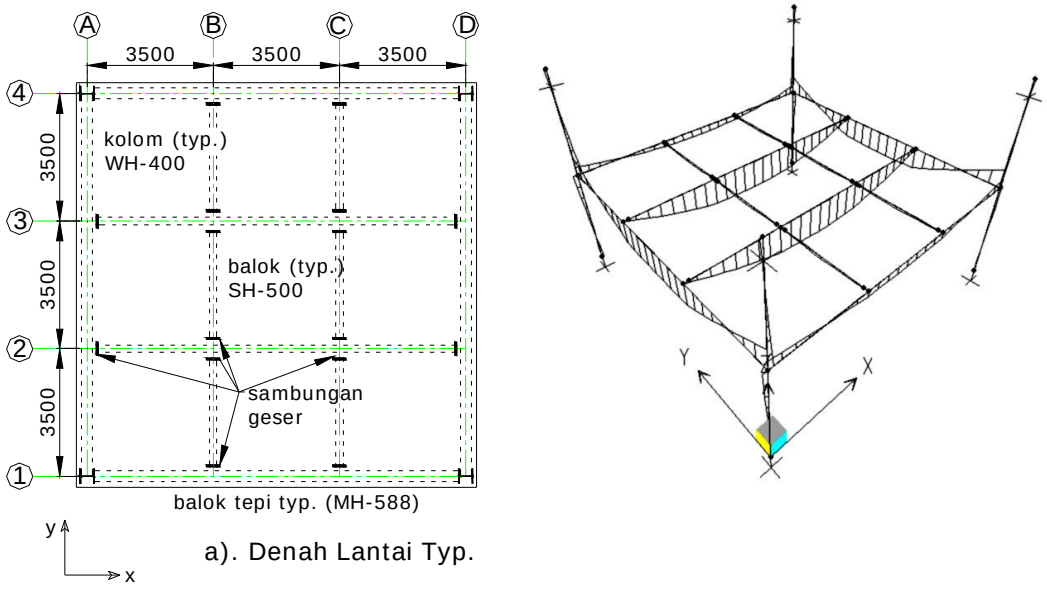
Gambar 23. Konfigurasi Struktur agar Berperilaku 3D *(Dewobroto 2007)*

Lebih lanjut, memang ada struktur yang memang harus dianalisis secara 3D, tetapi yang lain umumnya dapat dimodelkan 2D. Analisis 3D menuntut pemahaman yang lebih banyak tentang gaya-internal yang terjadi. Selain itu bisa terjadi perilaku model (yang dihitung) dengan yang ada di lapangan berbeda akibat perbedaan dalam proses konstruksi, perbedaan tersebut kadang kala memerlukan penyesuaian dari konfigurasi struktur maupun strategi pelaksanaannya di lapangan.

Gambar 23 adalah struktur dengan konfigurasi lantai bujur sangkar simetri, jadi jika sistem struktur baloknya dapat bekerja dalam dua arah (*two-way system*) maka struktur akan lebih efisien (hemat). Untuk konstruksi beton *cast-in-situ*, pemodelan struktur keseluruhan dapat dikerjakan apa adanya dan dari hasil analisis: sistem struktur menunjukkan perilaku 3D (lihat diagram momen di Gambar 23c). Dengan demikian distribusi pembebanan lantai didukung oleh semua balok akan sama besar (efisien). Hasil analisis selanjutnya dapat dengan mudah diterapkan pada konstruksi beton *cast-in-situ* di lapangan dan tidak ada masalah berarti.

Konstruksi baja berbeda, karena keterbatasan kemampuan sambungan (sambungan geser) maka dalam pemodelan 3D-nya perlu dipasang sendi (*option release*) pada ujung balok anak yang penempatannya simetri dalam dua arah (Gambar 23b). Dengan konfigurasi tersebut dapat dihasilkan sistem struktur yang selaras dengan sistem struktur beton bertulang.

Dalam pelaksanaannya ternyata konfigurasi struktur baja tersebut mempunyai kendala yaitu balok-balok tidak dapat dimanfaatkan sebagai perancah (*self-supporting structure*) sehingga perlu metode konstruksi tertentu (perlu perancah). Bagi orang awam perubahan penempatan sambungan tentu dapat dianggap sesuatu yang sepele, apalagi jika tidak melihat kronologi perencanaannya. Bahkan bagi insinyur perencana yunior bisa juga ikut terkecoh, karena dianggapnya bahwa metode pelaksanaan merupakan tanggung jawab kontraktor.



a). Baja dengan Penempatan Sambungan Beda *b). Diagram Momen*

Gambar 24. Konfigurasi Struktur Baja Usulan Kontraktor

Persyaratan tersebut kadang menjadi masalah bagi kontraktor pelaksananya. Bila tidak ada spesifikasi teknik yang khusus pada dokumen kontraknya maka tentunya kontraktor dapat mengajukan usulan berdasarkan pengalaman yang dimilikinya, misalnya : balok pada as 2 dan as 3 dipasang menerus agar struktur dapat juga digunakan sebagai perancah bagi balok-balok pada as B dan as C, dengan konsekuensi orientasi sambungan geser diubah menjadi Gambar 24a. Jika usulan dapat dilakukan tentunya akan ada penghematan biaya.

Jika perencana tidak memahami risiko usulan perubahan tersebut dan membiarkan terjadi, maka jelas perilaku sistem struktur yang dilaksanakan berbeda sekali dengan perencanaan awal. Bila di awal perencanaan diharapkan diperoleh penghematan dengan analisa 3D, dalam kenyataan : distribusi gaya tidak tersebar ke semua balok tetapi hanya bertumpu pada balok tertentu saja, sehingga jika itu terjadi maka bangunan berisiko tinggi mengalami 'kegagalan bangunan' pada beban penuh. Maksud hati ingin memanfaatkan fasilitas canggih komputer (analisis 3D) dan juga berpikiran bahwa cara seperti itu biasa dikerjakan pada konstruksi beton dan berhasil, tapi ternyata ketika diaplikasikan pada konstruksi baja tanpa memahami **aspek-aspek pelaksanaannya** maka risikonya tinggi dan berbahaya.

6. PERENCANAAN KHUSUS

6.1. Umum

Material baja yang buatan pabrik, mempunyai keunggulan mekanik yang tinggi dibanding bahan material lain (beton / kayu), tetapi relatif mahal. Padahal pemakaiannya kadangkala tidak bisa diberdayakan secara penuh, ada bagian-bagian yang bahkan tidak bekerja. Oleh karena itu untuk mengoptimasikan penggunaan material baja, dilakukan beberapa strategi. Setiap strategi tentu mengandung resiko atau tepatnya konsekuensi. Tapi jika dapat diketahui tentu bukan suatu masalah. Berikut adalah beberapa strategi optimalisasi yang ada.

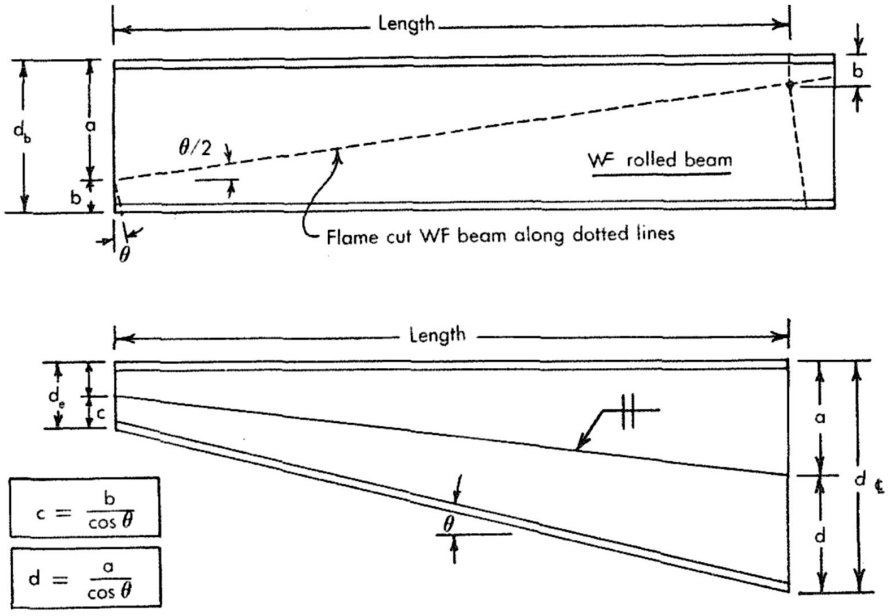
6.2. Sistem *Tapered*

Dasar pemikirannya sederhana bahwa ukuran (tinggi) balok disesuaikan dengan besarnya momen yang terjadi. Seperti diketahui bahwa untuk balok / portal sederhana, akibat beban merata maka momen maksimum hanya di tempat-tempat tertentu, jika simple-beam maka di lapangan, sedangkan untuk portal ada di sudut-portal. Dengan demikian jika dipakai ukuran profil yang sama di semua bentang pasti ada bagian yang tidak optimal. Oleh karena itu dengan memanfaatkan teknologi las, profil diubah sedemikian rupa menjadi bentuk *tapered*.

Gambar 25. Batang tapered pada Pre-engineered Steel Building *(Sumber : Zamil Steel)*

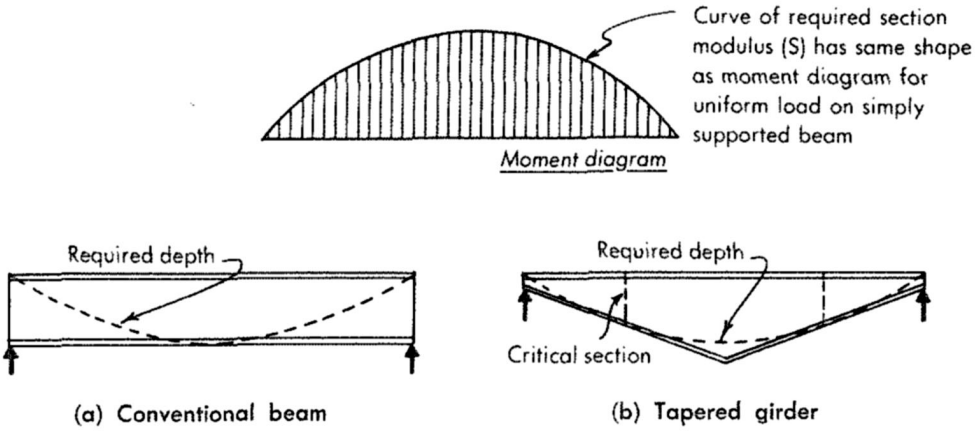
Strategi ini tentu akan cocok jika digabung dengan keunggulan baja jika digunakan dalam bentuk modul seragam, berulang dan berkuantitas besar seperti yang diterapkan pada *Pre-engineered Steel Building*. Biaya yang dikeluarkan untuk mengubah profil standar menjadi profil *tapered* jika dilakukan berulang-ulang akhirnya biaya produksinya dapat ditekan, dan dalam sisi lain diperoleh keuntungan dari penghematan (optimalisasi) material bajanya.

Jika digunakan teknologi pengelasan *submerged-arc weld* di bengkel fabrikasi maka tidak perlu *bevel* atau pekerjaan persiapan khusus pada bagian web yang dilas tersebut. Adapun formulasi geometri untuk pemotongan profil konvensional untuk dibuat profil *tapered* sbb.



Gambar 26. Rumus Pemotongan Batang Tapered *(Blodget 1976)*

Untuk desain penampang, prisipnya adalah memastikan bahwa di setiap titik, tegangan yang terjadi tidak melebihi tegangan ijin atau dalam format LRFD adalah $M_u < \phi M_n$. Masalahnya, pada pembebanan merata momennya berbentuk parabola sedangkan perubahan tinggi profil *tapered* adalah linier. Sehingga perlu dicari lokasi tinggi kritis / *critical depth* (Blodget 1976) yaitu tinggi profil minimum batang *tapered* yang diperlukan untuk menahan momen aktual.



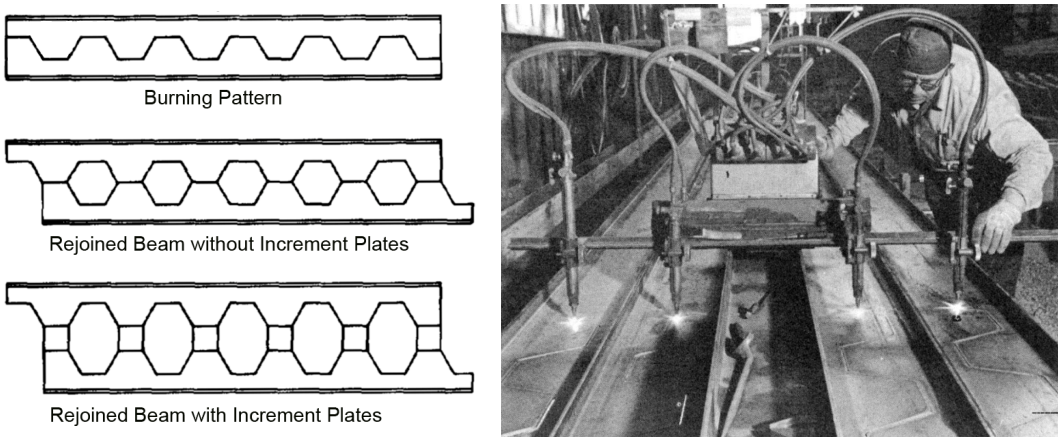
Gambar 27. Lokasi tinggi kritis batang Tapered terhadap momen aktual

Dari penelitian Blodget (1976) untuk balok tumpuan sederhana terhadap pembebanan merata maka lokasi tinggi kritis akan terletak pada ¼ bentangnya, dan bukan ditengah-tengahnya meskipun disitulah terletak momen maksimumnya.

Konfigurasi dan beban yang bekerja pada suatu struktur tidak mesti hanya menerima beban merata saja, bisa konfigurasi yang lain sehingga tiap-tiap kasus perlu dihitung secara khusus. Untuk mempermudah perhitungan, Blodget (1976) menyediakan tabel khusus yang berisi berbagai parameter batang *tapered* terhadap berbagai macam kondisi pembebanan. Adanya tabel siap pakai seperti itu tentu sangat membantu insinyur maupun pelaksana konstruksi baja untuk menentukan ukuran batang *tapered* yang paling optimal. Biaya yang dikeluarkan tentunya akan dapat menjadi lebih ekonomis lagi.

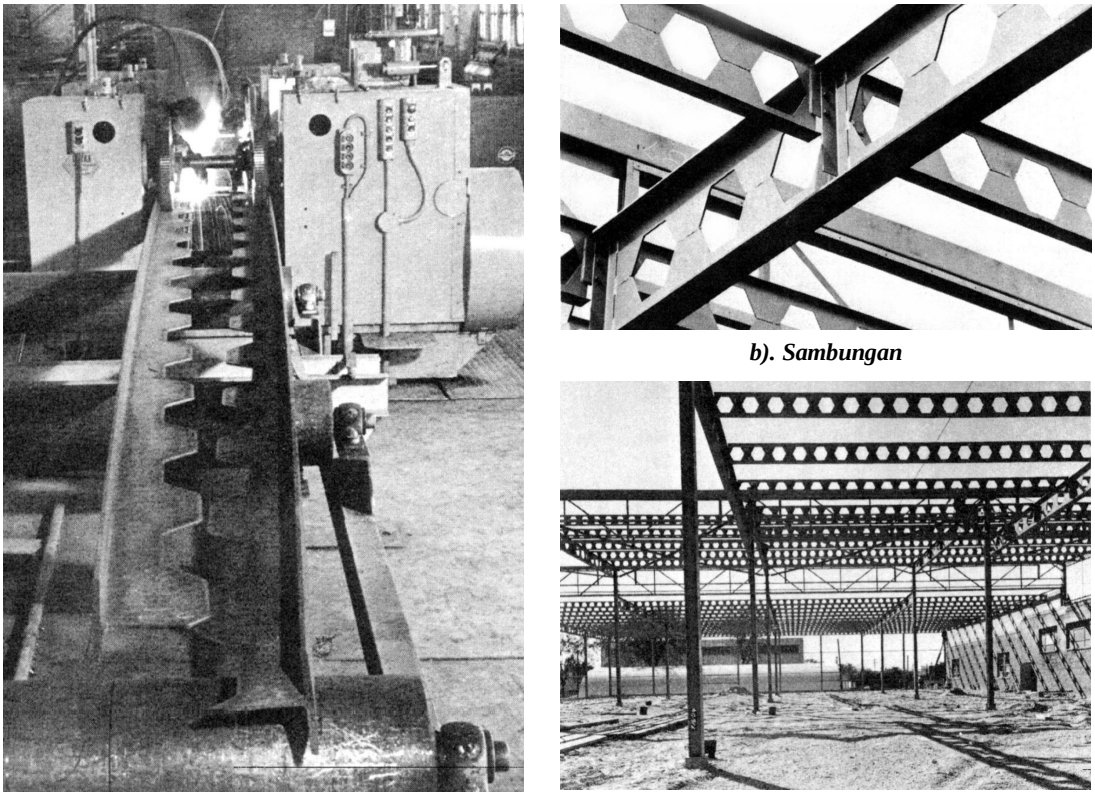
6.3. Sistem castellated

Teori balok lentur menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada sisi luar profil (*flange*) sedangkan di *web* bahkan nol di sumbu netralnya. Kecuali itu, jarak sisi-sisi luar menentukan besarnya inersia balok. Atas dasar itu maka sistem *castellated* memotong profil dan menempatkan sedemikian rupa sehingga properti penampangnya dapat meningkat.



Gambar 28. Sistem pembuatan balok Castellated *(Boyer 1964)*

Kecuali terjadinya peningkatan properti penampang secara signifikan, lobang ditengah profil memudahkan penempatan peralatan M&E, kondisi ini tentu disenangi arsitek. Penggunaan profil *castellated* sangat efektif untuk struktur yang didominasi momen dibanding gesernya, misalnya untuk struktur bentang lebar. Untuk daerah dengan momen dan geser tinggi, seperti tumpuan pada struktur menerus maka lobang ditutup pelat atau diberi perkuatan lain.



a). Proses rejoined

b). Sambungan

c). Aplikasi pada bangunan industri

Gambar 29. Sistem Castellated atau Honeycomb *(Boyer 1964)*

6.4. Sistem gelagar komposit

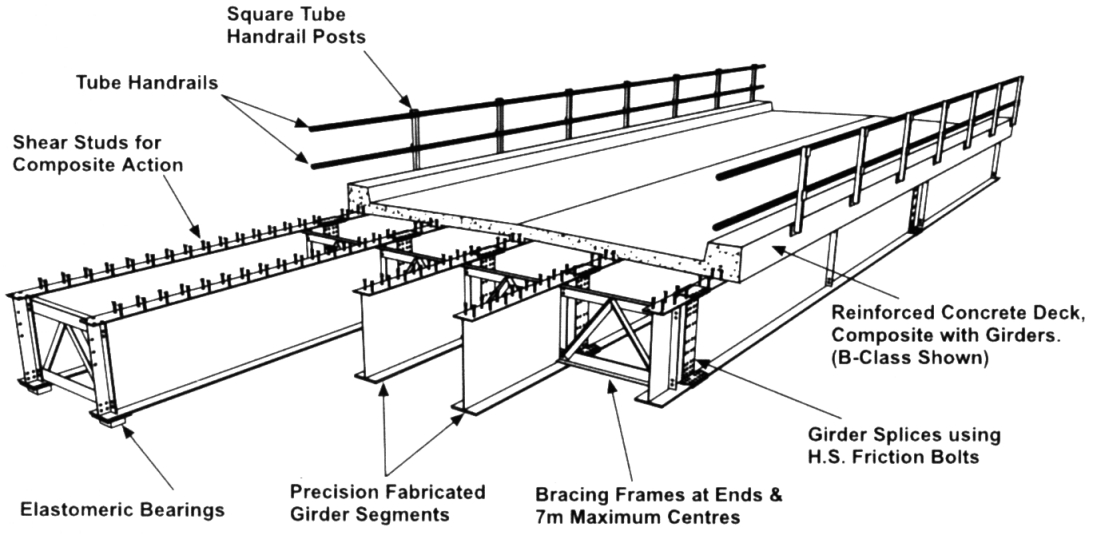
Usaha untuk memaksimalkan material terhadap gaya-gaya yang bekerja merupakan motivasi diciptakannya sistem baru. Jika hanya membicarakan tentang kemampuan material untuk menerima tegangan maka sebenarnya untuk baja tidak ada masalah, tegangan tarik / tekan sama saja. Ini jelas berbeda dibandingkan beton, dimana dalam desain bahkan kuat tariknya diabaikan, apalagi jika telah mengalami retak. Oleh karena itulah maka untuk struktur beton diperlukan tulangan baja sebagai antisipasinya. Jadi dalam struktur beton bertulang telah terjadi kerja sama sebagai satu kesatuan antara beton dan baja, sehingga mekanisme seperti itu juga dapat disebut sebagai komposit. Tetapi secara umum istilah komposit dikaitkan dengan elemen struktur yang mekanisme kerjanya ditentukan oleh kerja sama beton (bertulang) dan profil baja. Elemen struktur yang dimaksud dapat berupa kolom maupun balok.

Dari keduanya, yang paling signifikan pengaruhnya adalah balok yang dibebani lentur, sisi tarik ditahan oleh material baja secara efisien, sedangkan bagian desak ditahan oleh beton yang berdimensi lebih besar dan mempunyai ketahanan tekuk yang lebih baik. Jika dipakai baja untuk sisi desak akan tidak efisien, karena kegagalan tekuk akan terjadi lebih dulu tanpa harus mengalami kelelehan. Jadi penggunaan mutu baja tinggi tidak efisien.

Sistem balok komposit paling sesuai diterapkan pada balok yang mendukung lantai (yang terbuat dari beton bertulang), baik digunakan pada bangunan gedung maupun pada jembatan. Pada sistem balok lantai, agak susah membedakan dari tampilan luar apakah sistem balok baja non-komposit atau komposit. Perbedaan hanyalah ditentukan oleh keberadaan *shear stud* atau *shear connector* yang tertanam di dalam pelat betonnya, yang menyebabkan kedua komponen struktur (profil baja dan lantai beton) berperilaku komposit.

Agar aksi komposit bekerja dengan profil baja menerima tarik dan pelat beton menerima tekan maka sangat tergantung penempatannya. Karena pelat beton berfungsi juga sebagai lantai maka posisinya di atas, sedangkan profil baja di bawah. Untuk itu maka penerapannya pada sistem balok sederhana (*simple-beam*) adalah yang paling efisien, khususnya terhadap momen lapangan yang timbul. Adapun balok dengan sistem menerus, dimana momen terbesar berada di tumpuan maka kondisinya jadi terbalik, sisi tarik di atas (beton) dan isi tekan di bawah (baja) pada kondisi ini sebaiknya aksi komposit diabaikan.

Salah satu aplikasi gelagar komposit yang telah berhasil diterapkan pada jembatan standar di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 30 di bawah ini.

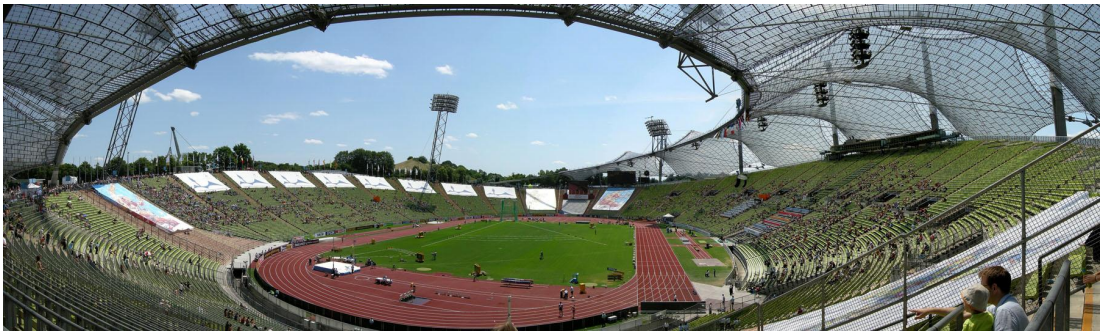


Gambar 30. Jembatan Standar Tipe Gelagar Baja Komposite *(Sumber : Trans Bakrie)*

6.5. Sistem prategang pada konstruksi baja

Material baja punya rasio kuat tarik dibanding berat-volume yang tinggi, sehingga cederung menghasilkan penampang langsing. Dengan demikian perilaku keruntuhan stabilitas akan mendominasi bila menerima beban tekan, sehingga keunggulan material dengan kuat tarik tinggi tidak bisa diberdayakan secara efisien. Satu-satunya agar efisien maka material baja diposisikan agar pada setiap kondisi pembebanan hanya akan menerima tegangan tarik saja. Adapun struktur yang hanya dapat menerima gaya tarik saja adalah struktur kabel.

Struktur kabel tradisionil dapat dilihat pada jembatan gantung dan jembatan *cable-stayed*. Sedangkan pada bangunan gedung, struktur kabel banyak dipakai pada atap bentang panjang, yang karena ringannya perlu diberi gaya prategang agar kekakuannya mencukupi. Untuk itu diperlukan suatu konfigurasi geometri yang tertentu pula, sebagai contoh struktur kabel atap Olympic Stadium Munich, Jerman, karya prof Frei Otto dari Uni Stuttgart. Karya itu merupakan cikal bakal dikembangkannya struktur ringan dan transparan di *Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren* (ILEK) pimpinan prof Werner Sobek, Uni Stuttgart, Jerman.



Gambar 31. Struktur kabel pada atap Olympic Stadium, Munich *(Sumber : Wikipedia)*

Penggunaan sistem prategang pada struktur kabel seperti di atas, merupakan bentuk struktur yang khusus dan bukan sekedar konstruksi baja yang diberi kabel prategang. Sistem ini juga merupakan salah satu contoh keunggulan material baja, karena belum ada material lain yang dapat diaplikasikan pada sistem struktur seperti itu.

Penggunaan sistem prategang pada konstruksi baja konvensional pada prinsipnya dapat juga dilakukan, jadi mirip seperti beton prategang. Intinya adalah memberikan gaya aktif yang akan bekerja pada struktur sehingga memberikan reaksi dengan arah berlawanan terhadap beban luar yang diberikan. Masalah yang dijumpai adalah bahwa gaya tarik yang diberikan pada kabel prategang akan memberikan reaksi berupa gaya tekan pada elemen baja, sehingga kalau struktur tersebut hanya terdiri dari struktur baja semua, maka tentu pengaruh lokal berupa gaya tekan yang terjadi harus diantipasi (resiko tinggi akan tekuk). Kecuali itu, karena struktur baja umumnya relatif ringan, maka gaya prategang bisa lebih besar dari berat sendiri struktur, sehingga sistem struktur baja bisa terangkat sehingga perlu diperhitungkan.

Struktur dengan sistem prategang patut dipertimbangkan untuk konstruksi baja yang beban matinya dominan. Struktur yang dimaksud adalah struktur balok (komposit) pemikul lantai beton pada gedung atau jembatan. Lantai beton memegang profil baja bagian atas, sehingga dapat bekerja sebagai *lateral bracing*. Jadi ketika profil-profil baja menerima gaya prategang maka resiko tekuk menjadi bukan masalah lagi. Itu menyebabkan tujuan sistem prategang dapat bekerja sesuai harapan, yaitu meningkatkan kinerja struktur secara keseluruhan.

Densford et. al. (1990) mempunyai data perbandingan jumlah profil baja, baja tulangan dan kebutuhan beton dari jembatan I-Beam milik Departemen Perhubungan Oklahoma bentang 55 ft (16.7 m) dan lebar 26 ft (7.9 m). Pada konfigurasi yang sama telah dibuat tiga macam perencanaan, yaitu kondisi non-komposit, komposit dan prategang-komposit.

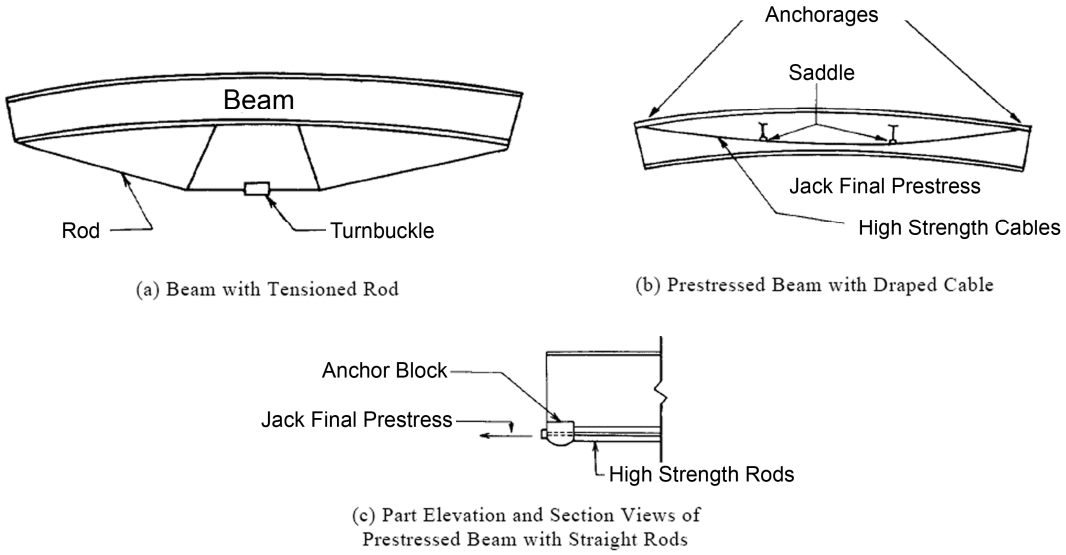
Tabel 3. Perbandingan Pemakaian Material (Densford et. al 1990)

	Kebutuhan Baja (lbs)			Beton
Kondisi Jembatan	Profil		Tulangan	(cy)
I-Beams non-komposit	51,920 (A36)	100%	6535	35.7
I-Beams komposit	29,700 (A36) 25,520 (A588)	57% 49%	9310	44.4
Prategang komposit	18,150 (A588)	35%	6412	32.4

Dari penelitian Densford et. al (1990) dapat diketahui bahwa penggunaan sistem prategang memberikan keuntungan signifikan berupa penghematan pemakaian profil baja, sehingga tentunya dapat dihasilkan jembatan baja yang lebih ekonomis.

Ada tiga metode pemberian prategang balok baja (Densford et. al 1990), yaitu [1] melalui kabel / batang prategang yang diangkur di ujung-ujung, seperti balok beton prategang biasa; [2] komponen mutu tinggi yang diberi prategang disatukan (dengan las) pada profil baja lain yang menghasilkan balok hibrida; [3] pracetak prategang balok komposit, saat pelat beton dicor pada profil baja dengan *camber*, diberikan gaya-gaya luar berlawanan arah *camber*.

Metode-metode tesebut akan disajikan berturut-turut mulai yang pertama sebagai berikut:



Gambar 32. Sistem prategang dengan kabel / batang yang diangkur *(Densford et. al 1990)*

Prategang dengan *turnbuckle* dapat dikerjakan secara manual, cocok diterapkan pada struktur baja yang ringan. Penulis pernah mengaplikasikannya pada perlombaan jembatan model untuk mahasiswa di tingkat nasional dan hasilnya sangat memuaskan (Dewobroto 2007a).

Sistem prategang memakai kabel mutu tinggi, gaya prategang diberikan melalui dongkrak hidraulik. Gaya yang dihasilkan tentu sangat besar dan hanya cocok untuk struktur dengan pertambatan lateral terjamin dan relatif berat. Ini banyak dipakai untuk konstruksi balok pada jembatan baja. Karena kabel prategang ditempatkan di luar (*external prestressing*) maka umumnya banyak dipakai juga sebagai strategi perkuatan jembatan yang sudah ada.

Penggunaan sistem prategang luar pada perkuatan baja dengan menempatkan sistem prategang di bagian bawah (Gambar 33a) kadang beresiko tinggi jika dilakukan pada sungai dengan muka air yang tinggi apalagi jika ada banjir. Sistem kabel prategang dapat terendam air, atau dapat juga rusak tersangkut sesuatu yang terhanyut di sungai.

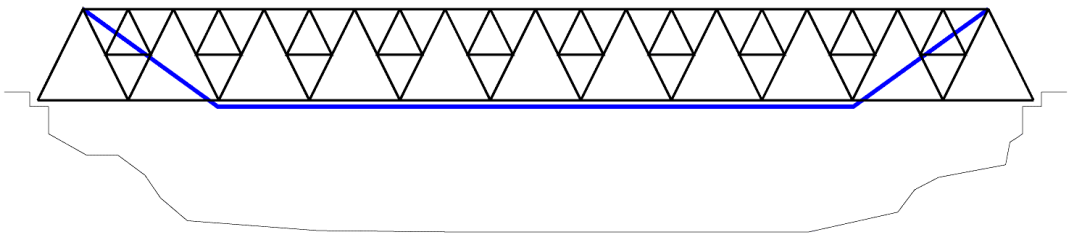
Kalaupun kabelnya tidak rusak, tetapi bisa jadi lapisan pelindung korosinya menjadi terluka. Ketika itu terjadi maka korosilah yang berpotensi menjadi media penghancur. Berkaitan dengan hal tersebut maka diperlukan strategi perawatan yang seksama dan harus cukup rutin pelaksanaannya, suatu hal yang kurang mendapat perhatian di Indonesia.

a). Kabel dan saddle

b). Anchorages

Gambar 33. Sistem perkuatan kabel pada jembatan Condet, Jakarta *(Sumber : Daly dan Winarwan)*

Cara prategang luar (*external prestressing*) tidak hanya digunakan pada sistem balok baja, tetapi juga dapat secara sukses diterapkan pada jembatan rangka baja. Biasanya perkuatan seperti itu diperlukan karena usia jembatan yang sudah lama sehingga diperlukan suatu peningkatan kapasitas yang diakibatkan adanya pertumbuhan volume lalu-lintas jalan atau bisa juga karena adanya degradasi sistem struktur yang tidak diduga sebelumnya.



a). Orientasi penempatan kabel prategang

b). Kabel dan saddle

c). Anchorages

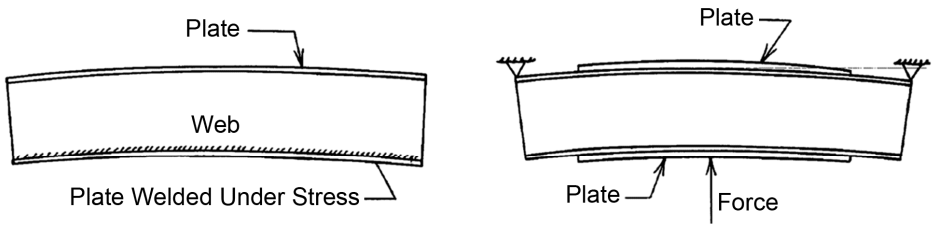
Gambar 34. Aplikasi prategang pada jembatan Callendar Hamilton di Pantura *(Zarkasi 2005)*

Alasan dilakukannya perkuatan dengan sistem prategang pada jembatan-jembatan pantura adalah adanya degradasi kekuatan akibat mutu sambungan baut yang berkurang, yang mana jika dibiarkan akan menimbulkan kegagalan fatig. Juga tentunya agar sesuai dengan adanya peningkatan volume jalan yang meningkat. Jadi ini tindakan preventif.

Sistem prategang memakai kabel mutu tinggi mempunyai kemiripan dengan sistem *post-tensioning* yang terdapat pada balok beton prategang, dimana gaya prategang diaplikasikan pada balok setelah terpasang di lapangan. Dalam pelaksanaannya sistem tersebut terdiri dari *anchorages* dan sistem pelindung kabel anti korosi, yang biasanya merupakan produk patent yang menyebabkan sistem ini relatif mahal. Jadi tidak sesuai untuk produk massal. Itulah mengapa dalam aplikasinya hanya dijumpai pada perkuatan sistem struktur yang ada.

Sistem balok hibrida dan juga maupun balok yang diberi *camber* dan diluruskan dengan gaya luar ketika dilakukan pengecoran, tanpa memakai kabel mutu tinggi untuk memberikan gaya prategang, menjadi alternatif sistem prategang yang lebih murah jika dipakai secara massal.

Sistem balok baja hibrida yang memanfaatkan sistem prategang ada dua cara pembuatannya sebagaimana terlihat pada gambar berikut.



a). Prestressing by Applying Direct Tension to High Strength Plate

b). Prestressing by Deflecting a Beam and Attaching Cover Plate

Gambar 35. Sistem prategang balok hibrida *(Densford et. al 1990)*

Cara pertama (Gambar 35a) pelat baja mutu tinggi diberi gaya tarik pada ujung-ujungnya sehingga mengalami perpanjangan, pada kondisi tersebut ditangkupkan profil T (akan jadi balok bagian atas). Pada kondisi pelat mutu tinggi mengalami peregangan, sedangkan profil T kondisi normal kemudian keduanya disatukan dengan sistem sambungan las. Setelah itu gaya tarik pada pelat mutu tinggi dilepas. Selama gaya tarik pada pelat mutu tinggi masih dalam kondisi elastis (belum mencapai leleh) maka kondisinya tentu akan memendek lagi ke kondisi awal. Karena saat ini sudah menyatu dengan profil T dengan las, maka perpendekan tadi menghasilkan gaya prategang yang diharapkan pada balok hibrida.

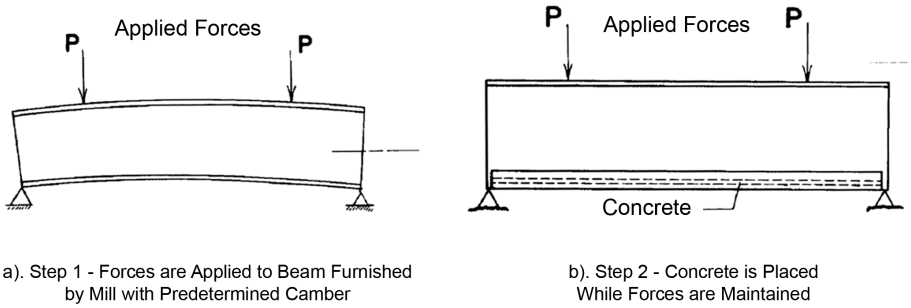
Cara kedua (Gambar 35b), profil baja ditempatkan pada tumpuan di ujung-ujung, kemudian diatas dan bawah dipasang *cover-plate* bahan mutu tinggi secara lepas (belum disambung). Pada kondisi seperti itu konfigurasi tersebut diberi beban (dongkrak) sehingga profil baja melendut (berdeformasi). Pada kondisi seperti itu selanjutnya *cover-plate* atas dan bawah disambung dengan las sampai menyatu. Saat pembebanan dilepas maka akan menghasilkan tegangan prategang yang diharapkan pada balok hibrida.

Fabrikasi balok hibrida di atas memerlukan peralatan khusus, tentunya perlu investasi tidak murah. Oleh karena itu hanya sesuai untuk produk massal berkesinambungan. Kecuali itu perlu diperhatikan ukuran balok hibrida, dibatasi oleh alat angkut dan pembatasan lalu-lintas jalan, agar transportasinya tidak menjadi masalah.

Balok hibrida pada kasus di atas adalah profil baja dengan gaya prategang, secara visual bisa dibedakan dari deformasi awal yang terjadi. Dalam pemasangan balok hibrida juga tidak sembarangan seperti balok konvensional, tetapi harus dipastikan bagian sayap yang mana yang diberi prategang dan mana yang tidak. Oleh karena itu dalam pemasangannya perlu diwaspadai agar jangan sampai terbalik. Jika terjadi, yang seharusnya atas tetapi menjadi bagian bawah maka jelas sistem prategang yang diberikan menjadi tidak efektif. Prategang tidak meningkatkan kapasitas balok tetapi bahkan mengurangi karena jadi beban tambahan.

Cara praktis sederhana untuk mengatasi permasalahan akibat salah penempatan sayap adalah dengan membuat balok hibrida mempunyai ukuran sayap berbeda antara atas dan bawah.

Penggunaan alat khusus untuk menghasilkan gaya prategang pada balok hibrida, bisa saja menjadi masalah sehingga tidak dapat diterapkan. Ada cara lain yang telah diproduksi yaitu efek prategang yang dihasilkan dari proses pengecoran pelat lantai. Karena telah melibatkan profil baja dan pelat beton maka sistem ini sebenarnya adalah sistem **pracetak prategang balok komposit**. Sebagai konsekuensi sistem ini dibanding balok hibrida adalah bahwa sistem ini lebih berat karena sudah termasuk pelat betonnya, jadi proses transportasi dan *erection* menjadi masalah yang perlu dipikirkan dengan baik bila dipilih pada suatu proyek.

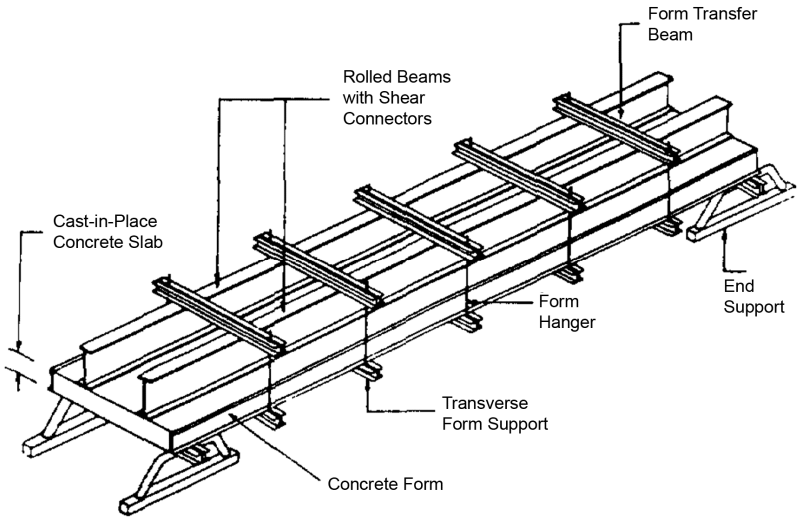


Gambar 36. Pracetak prategang balok komposit. *(Densford et. al. 1990)*

Untuk pembuatannya, pertama-tama perlu disediakan profil balok baja yang diberi *camber* tertentu secara khusus. Karena ini merupakan aksi komposit antara profil baja dan pelat beton maka harus dipasang terlebih dahulu *shear connector* sebelum dilakukan pengecoran.

Selanjutnya profil diposisikan seperti Gambar 36a, kemudian diberi pembebanan luar yang menimbulkan lendutan yang sama besar dengan *camber* yang telah disiapkan sebelumnya. Pada posisi tersebut, kemudian dilakukan pengecoran pelat beton, dimana posisi pengecoran ada di bawah (lihat Gambar 36b). Tentu saja pemberian beban masih terus dilakukan sampai pelat beton mengeras. Baru setelah itu beban dapat dilepas, pada kondisi ini karena bagian sayap profil yang tertanam pada pelat beton dari memanjang (akibat pembebanan luar) jadi memendek, maka pada pelat beton timbul tegangan tekan (*precompression stress*).

Sistem pracetak prategang balok komposit dalam aplikasinya jika beban diberikan dalam bentuk sistem jack / dongkrak dikenal sebagai "Preflex Technique" yang merupakan patent dari Preflex Corporation of America. Adapun yang memanfaatkan berat sendiri beton yang akan dicor dinamai metode INVERSET, yang merupakan inovasi hasil riset Fears Structural Engineering Laboratory, Universitas Oklahoma (Densford et.al 1990).

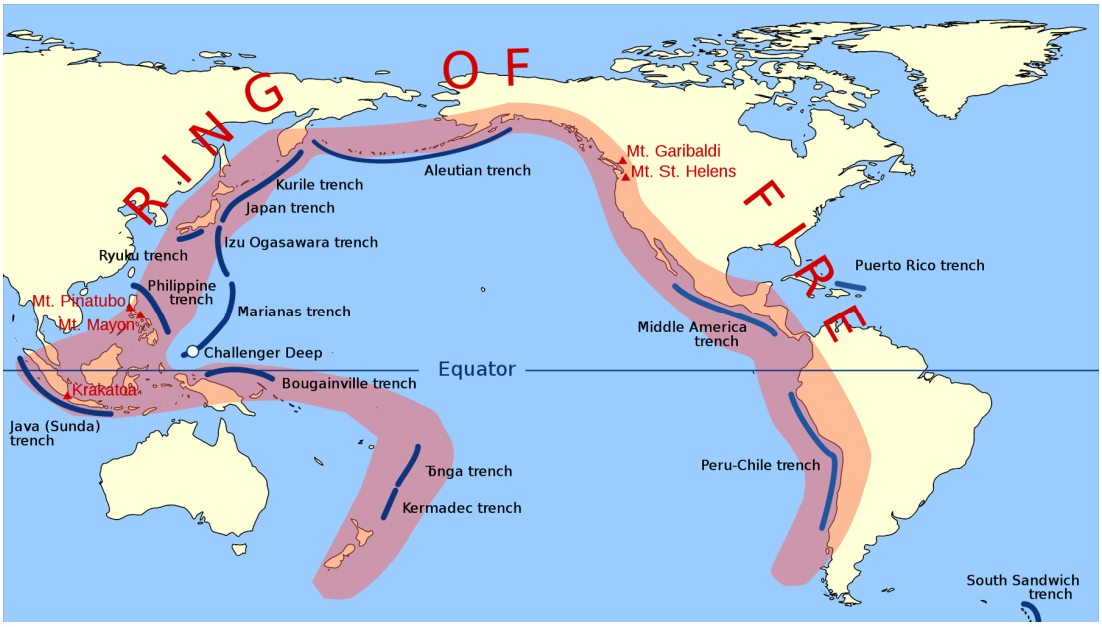


Gambar 37. Proses pembuatan pracetak prategang balok komposit dengan metode Inverset

7. SISTEM STRUKTUR BAJA TAHAN GEMPA

7.1. Umum

Sebagai *engineer* tentu masih ingat tentang kejadian gempa 26 Desember 2004 di Aceh pada 9.3 Skala Richter (SR) yang disertai tsunami, lalu gempa 27 Mei 2006 di Yogyakarta pada 5.9 SR, lalu gempa 30 September 2009 pada 7.6 SR di Padang. Itu kejadian di dalam negeri sedangkan di luar negeri tercatat gempa 15 Agustus 2007 di Peru, pada 7.9 SR. Sedangkan yang baru saja terjadi adalah gempa 22 Februari 2011 di Christchurch, Selandia Baru pada 6.5 SR, dan yang baru saja terjadi adalah gempa 11 Maret 2011 di Jepang pada 8.9 SR yang disertai tsunami. Gempa-gempa tersebut dan lokasinya ternyata dapat dijadikan bukti empiris bahwa apa yang dinamakan peta ***ring of fire*** adalah bukan sesuatu yang dapat disepelekan.



Gambar 38. Resiko gempa pada wilayah Ring of Fire

Karena Indonesia termasuk dalam wilayah peta ***Ring of Fire***, berarti resiko gempa seperti itu memang akan sering terus terjadi, yang waktunya saja yang tidak dapat dipastikan. Sebagai profesional yang bertanggung jawab pada perencanaan bangunan agar kuat, kaku dan aman, maka mengetahui berbagai alternatif perencanaan bangunan tahan gempa merupakan suatu kewajiban. Baja secara alami mempunyai rasio kuat dibanding berat-volume yang tinggi, sehingga mampu menghasilkan bangunan yang relatif **ringan**. Ini merupakan faktor penting pada suatu bangunan tahan gempa. Selain material baja itu sendiri karakternya **berkuatan tinggi**, relatif **kaku** dan sangat **daktail**. Karakter yang terakhir ini adalah syarat ideal untuk mengantisipasi beban tak terduga.

Keunggulan lain konstruksi baja adalah mutunya relatif seragam dikarenakan produk pabrik. Karena itu pula ukuran dan bentuknya juga tertentu, terpisah dan baru disatukan di lapangan. Pada satu sisi konsep seperti itu suatu kelemahan atau sulit untuk menghasilkan konstruksi monolit, perlu detail sambungan yang baik. Tapi jika dapat diantisipasi ternyata dapat dibuat suatu detail sedemikian rupa sehingga bila terjadi kerusakan (akibat gempa) maka bagian itu saja yang diperbaiki. Itu sangat memungkinkan karena dari awal memang tidak monolit.

Adanya faktor-faktor seperti itu maka pada konstruksi baja banyak dijumpai berbagai macam variasi sistem struktur tahan gempa dibanding konstruksi dari material yang lain. Itu semua membuat struktur baja menjadi tujuan awal untuk dipelajari jika akan dibuat bangunan tahan gempa yang handal.

7.2. Perilaku sistem yang diharapkan

Untuk pembebanan gravitasi (akibat berat sendiri, beban mati tambahan dan beban hidup), beban angin dan beban gempa sedang (gempa yang sering terjadi) maka diharapkan struktur dapat berperilaku elastis (beban hilang maka deformasi hilang). Tetapi pada gempa besar, yaitu suatu kondisi gempa sedemikian sehingga jika struktur didesain secara elastis akan sangat tidak praktis dan mahal maka diperbolehkan mengalami kondisi inelastis.

Oleh karena itu dan juga karena tidak adanya jaminan bahwa gempa yang akan terjadi pasti selalu dibawah gempa rencana yang ditetapkan *code*, maka cara perencanaan struktur tahan gempa adalah didasarkan pada metodologi *capacity design*. Dengan cara tersebut struktur direncanakan sedemikian sehingga bila terjadi kondisi inelastis hanya terjadi pada tempat yang ditentukan yang memang telah terencana. Kondisi inelastis yang terjadi juga terkontrol, sebagai tempat dissipasi energi. Sedangkan bagian struktur lainnya tetap berperilaku elastis. Jadi cara kerjanya seperti alat sekring (*fuse*) pada peralatan listrik saat menerima *overload*.

Adanya bagian yang terpisah-pisah, ada yang bekerja elastis dan ada yang lain inelastis dapat dengan mudah diterapkan pada konstruksi baja yang memang dari awalnya bersifat modul atau segmen terpisah yang tidak monolit. Bandingkan dengan konstruksi beton yang secara alami bersifat monolit (untuk beton *cast-in-situ*).

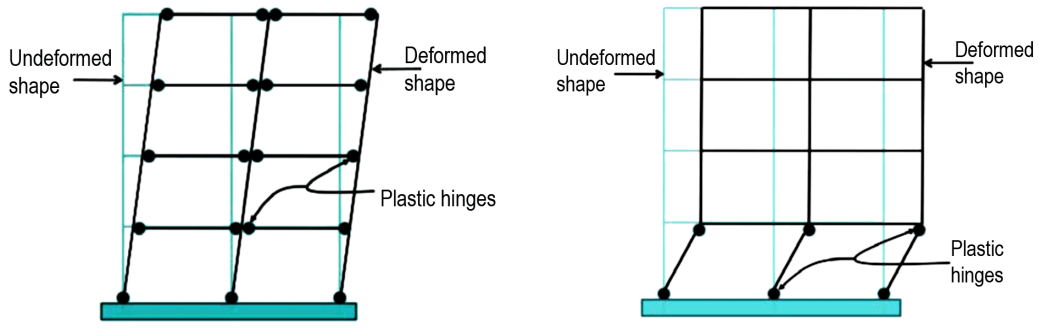
Selanjutnya bagian mana dari sistem struktur tahan gempa yang akan bekerja seperti *fuse* dan bagian mana yang tidak, disitulah yang menjadi variasinya. Struktur *Special Moment Frames* misalnya, yang akan berfungsi sebagai *fuse*, tempat dissipasi energi gempa, adalah sendi plastis yang terbentuk di balok. Untuk sistem struktur yang lain, yang berfungsi sebagai *fuse*, bisa berbentuk lain (AISC 2005b, Geschwinder 2008). Untuk itu akan ditinjau satu persatu.

7.3. Sistem portal (Moment-Frame Systems)

7.3.1. Special Moment Frames (SMF)

Ini adalah jenis rangka yang didesain untuk bekerja secara inelastis penuh. Oleh karena itu pada bagian yang akan mengalami sendi-plastis perlu didesain secara khusus. Cocok dipakai untuk perencanaan gedung tinggi yang masih memungkinkan dengan sistem frame.

Struktur rangka harus berperilaku *strong-colum-weak-beam* agar tidak terjadi sendi plastis di kolom yang dapat menyebabkan *story mechanisms*.

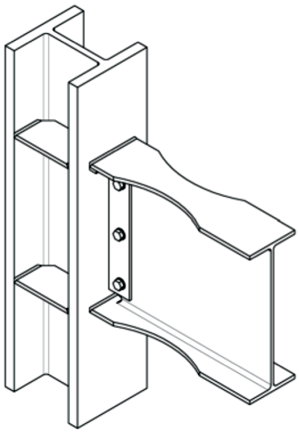


a). Strong column-weak beam ***b). Story mechanism***

Gambar 39. Perilaku inelastis sistem portal daktail *(Hamburger et.al. 2009)*

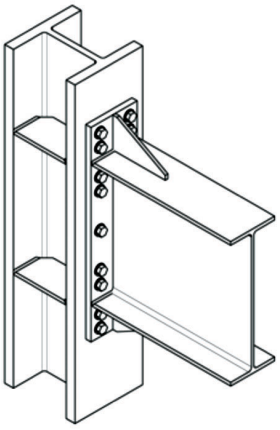
Jenis sambungan kolom-balok yang akan dipakai rangka SMF harus didukung data empiris hasil uji laboratorium, untuk membuktikan bahwa jenis sambungan tersebut mempunyai kemampuan daktilitas yang mencukupi, yaitu mampu menahan perputaran sudut *interstory-drift* minimum sebesar 0.04 radian (Section 9.2a AISC 2005b).

Beberapa jenis sambungan yang telah dilakukan pengujian adalah sebagai berikut.



a). Prespektif ***b). Aplikasi***

Gambar 40. Reduced beam *(Hamburger et.al. 2009)*



a). Prespektif ***b). Aplikasi***

Gambar 41. Extended End-Plate *(Hamburger et.al. 2009)*

Kecuali dua jenis sambungan yang ditampilkan pada gambar di atas masih ada beberapa lagi yang dapat dijumpai. Adanya variasi jenis sambungan umumnya **berkaitan dengan metode pelaksanaan**, misal sambungan jenis *Reduced Beam* memerlukan pekerjaan las di lapangan. Persyaratan tersebut tentu terkait dengan harus disediakannya s.d.m yang kompeten disertai pengawasan ketat. Hal berbeda jika digunakan jenis *Extended End-Plate* yang cukup dengan pemasangan baut mutu tinggi. Hanya saja untuk jenis sambungan itu memerlukan tingkat presisi pekerjaan fabrikasi yang tinggi, jika didukung mesin CNC tentu bukan masalah.

7.3.2. Intermediate Moment Frames (IMF)

Jenis rangka ini mirip SMF yaitu mampu berperilaku inelastis tetapi terbatas. Cocok dipakai untuk sistem struktur dengan gempa yang relatif sedang, misal bangunan bertingkat rendah. Sistem sambungan kolom-balok mirip SMF hanya saja tingkat daktilitasnya terbatas, yaitu perputaran sudut *interstory-drift* minimum 0.02 radian (Section 10.2a AISC 2005b).

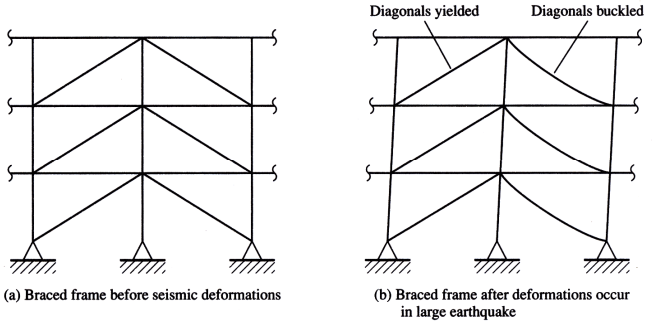
7.3.3. Ordinary Moment Frames (OMF)

Ini adalah jenis rangka yang didesain untuk bekerja secara elastis saja. Oleh karena itu hanya cocok digunakan untuk sistem struktur dengan beban gravitasi yang dominan, misalnya bangunan tidak bertingkat yang memiliki bentang panjang. Sistem sambungan balok-kolom yang digunakan dapat berupa sambungan momen penuh atau *full restrained* (FR), juga semi rigid atau *partially restrained* (PR).

7.4. Sistem rangka batang silang (Braced-Frame Systems)

7.4.1. Special Concentrically Braced Frames (SCBF)

Rangka yang menganut SCBF dikonfigurasi sedemikian sehingga *bracing* bekerja sebagai *fuse* melalui aksi leleh tarik atau tekuk tekan batang diagonal ketika terjadi gempa besar.



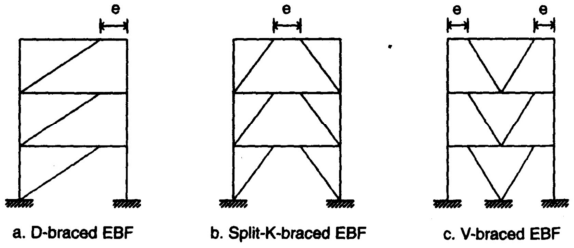
Gambar 42. Mekanisme inelastis SCBF

7.4.2. Ordinary Concentrically Braced Frames (OCBF)

Bekerja seperti sistem SCBF tetapi tidak bisa mengandalkan aksi inelastik saat gempa besar. Jadi sistem ini hanya cocok digunakan pada sistem struktur yang didominasi beban gravitasi.

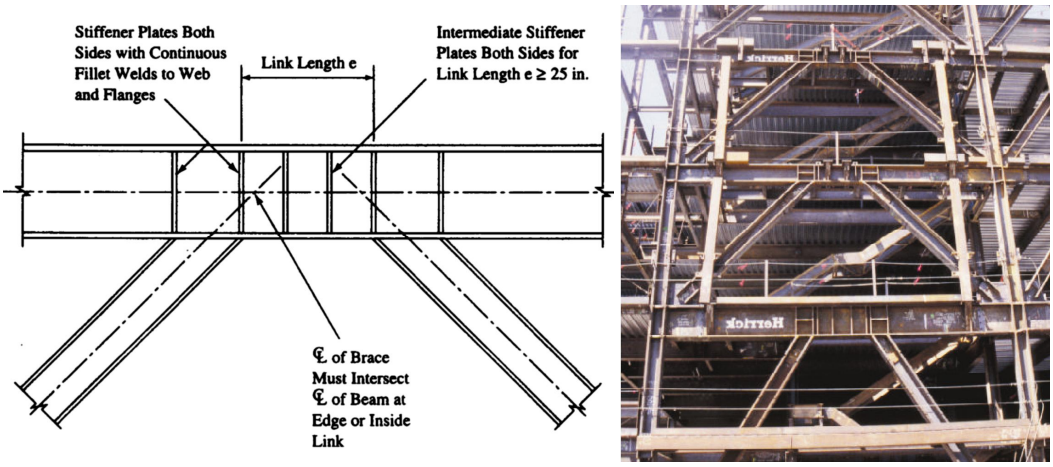
7.4.3. Eccentrically Braced Framed (EBF)

Cara kerja rangka EBF mirip dengan SCBF hanya saja *fuse* atau LINK diharapkan bekerja secara inelastik memanfaatkan adanya leleh geser atau leleh lentur atau kombinasi keduanya.



Gambar 43. Berbagai variasi konfigurasi EBF *(Sumber A. Whittaker)*

Dari tiga konfigurasi tersebut maka jenis Split-K-braced merupakan konfigurasi yang terbaik karena momen terbesar yang akan mendekati kondisi plastik tidak terjadi di dekat kolom.

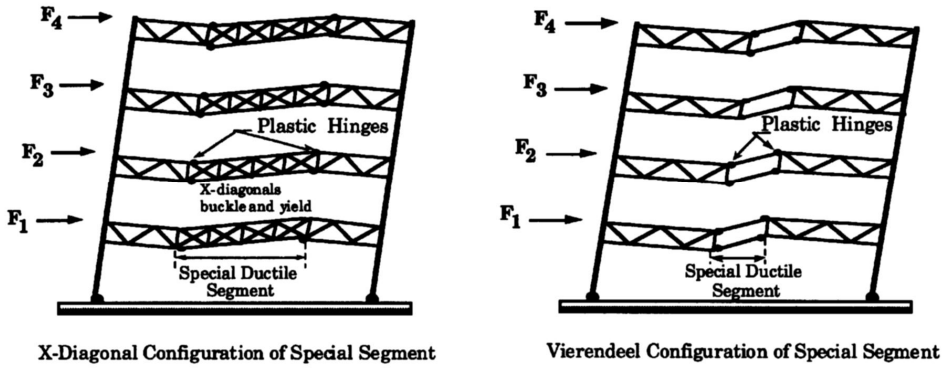


Gambar 44. Split-K-braced EBF :Detail Link (kiri) dan Tampak (kanan)

7.5. Sistem lainnya

7.5.1. Special Truss Moment Frames (STMF)

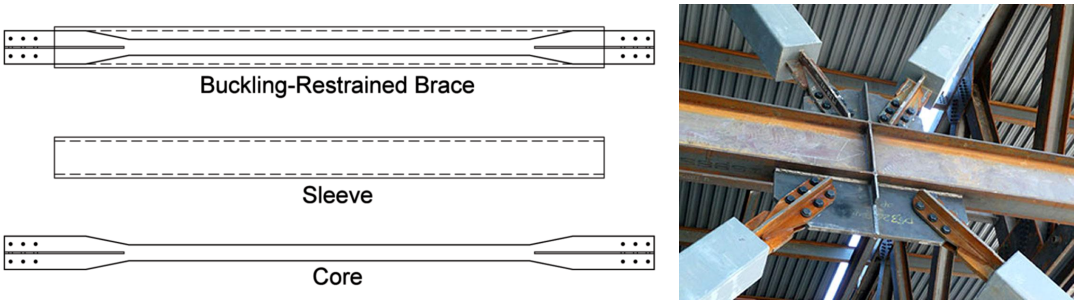
STMF adalah sistem struktur dengan rangka batang (truss diagonal) atau juga Vierendeel sebagai elemen horizontalnya. Saat gempa besar ada bagian elemen horizontal secara khusus dapat mengalami kondisi inelastis, yang bekerja sebagai *fuse* (tempat dissipasi energi).



Gambar 45. Perilaku inelastis STMF *(Basha and Goel 1996).*

7.5.2. Buckling-Restrained Braced Frames (BRBF)

BRBF sejenis *Concentrically Braced Frames* tetapi *bracing*-nya berupa elemen khusus, yang mampu berperilaku inelastis baik terhadap tarik maupun tekan. Untuk mengantisipasi tekuk maka elemen khusus tersebut terdiri dari batang terbungkus suatu elemen penutup yang mencegah terjadinya tekuk, sehingga ketika ada gaya tekan cenderung mengalami leleh saja.



Gambar 46. Detail dan tampak BRBF *(Sabelli and López 2004)*

7.5.3. Special Plate Shear Walls (SPSW)

Ini berbentuk struktur rangka dengan dinding pengisi berupa pelat baja di dalamnya, yang akan bekerja sebagai *fuse* dengan mekanisme leleh pelat dan tekuk (*tension field action*).

Gambar 47. Steel Plate Shear Walls *(Seilie and Hooper 2005).*

8. PELAKSANAAN KONSTRUKSI BANGUNAN BAJA

8.1. Proses Transfer Perencana (Umum) – Kontraktor (Spesialis)

Tahapan berikutnya setelah perencanaan selesai adalah pelaksanaan konstruksi itu sendiri. Struktur baja belum mendominasi pemakaiannya di Indonesia sehingga konsultan perencana umumnya bukan spesialis baja saja, tetapi umum (tergantung proyek). Sedangkan di sisi lain, kontraktor baja umumnya spesialis, karena mengerjakan pekerjaan baja perlu investasi lebih, seperti misalnya peralatan khusus di bengkel kerja juga kompetensi s.d.m-nya. Hal seperti itu kadang dapat menimbulkan masalah, contohnya tentang ketersediaan profil baja. Konsultan menghitung berdasarkan tabel baja umum, sedangkan kontraktor berdasarkan ketersediaan stock pasaran. Masalahnya adalah jika ternyata profil yang dipilih perencana ternyata tidak ada di pasaran, atau kalaupun ada harus menunggu impor terlebih dahulu, yang tentunya dapat menghambat proyek. Sehingga jika diputuskan melakukan pergantian profil, maka bisa-bisa semua detail yang telah direncanakan dapat berubah. Biaya juga bisa berubah juga. Hal seperti ini jika tidak diperhatikan dapat menghasilkan penundaan. Proyek bangunan baja yang katanya cepat ternyata tidak terbukti. Itu bisa mengecewakan dan akhirnya berpindah ke material lain (beton). Jika sering terjadi, orang tidak perlu berpikir dulu untuk memakai struktur baja tapi langsung saja memilih struktur beton.

8.2. Fabrikasi

Agar dapat dilakukan proses fabrikasi maka gambar desain (*design-drawing*) dari perencana diuraikan lagi menjadi gambar-gambar detail untuk fabrikasi yang disebut gambar kerja (*shop-drawing*). Prosesnya sekarang dipermudah dengan adanya program canggih, seperti Tekla (www.tekla.com). Kecuali *shop-drawaing*, dengan memakai program tersebut dengan data yang sama dapat langsung dihasilkan angka estimasi biaya, juga data ke mesin CNC untuk proses fabrikasi yang presisi. Tentu saja agar bisa digunakan secara maksimal harus ditunjang *hardware* yang mendukung.

Gambar 48. Suasana di Bengkel Kerja *(Sumber : http://acip-inc.com)*

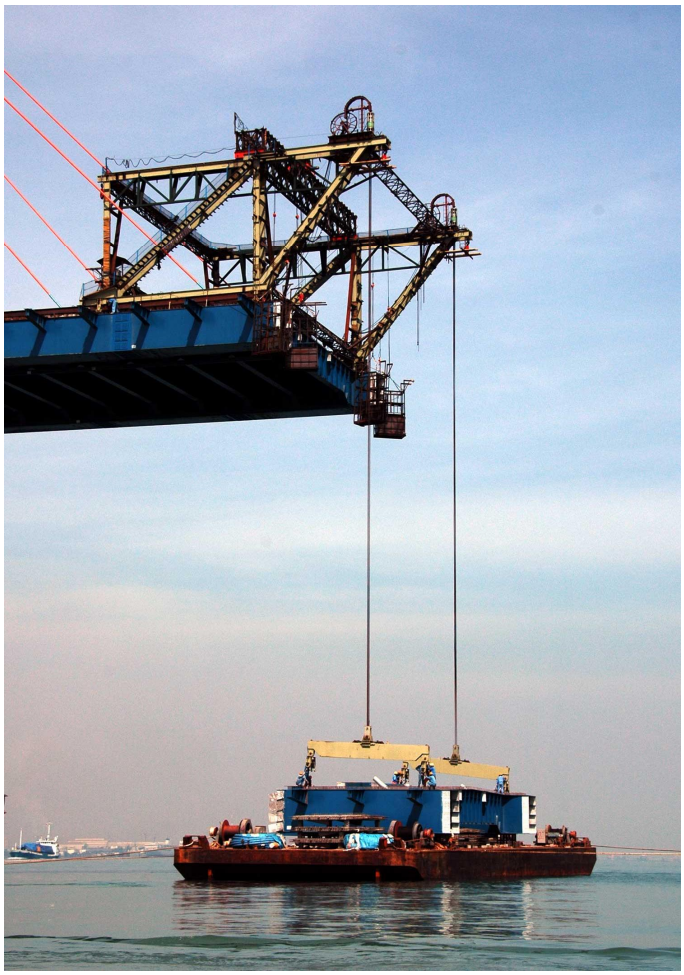
Suasana bengkel kerja seperti pabrik pada umumnya, jadi sekali proyek baja seterusnya juga proyek baja, karena kalau tidak maka investasi jadi mubazir. Dalam bengkel kerja minimal tersedia alat angkat (*crane*), untuk bengkel modern akan dilengkapi mesin CNC, baik untuk memotong atau melubangi profil / pelat baja yang dikontrol komputer sehingga dijamin tingkat presisinya tinggi. Ingat presisi lubang baut adalah dalam orde 1/16” atau 1.5 mm.

Salah satu cara sederhana bagi pemilik proyek untuk mendapatkan keyakinan apakah proyek konstruksi baja miliknya akan berjalan lancar adalah dengan mengunjungi bengkel fabrikasi milik kontraktornya. Jadi jangan terpaku pada harga tender yang murah saja atau portofolio perusahaan yang tercetak rapi dan berwarna. Cara berpikir seperti inilah yang menghasilkan mengapa ada kontraktor spesialis baja, dan kalaupun ada kontraktor umum yang menerima pekerjaan baja maka umumnya akan diberikan kepada subkontraktor spesialis baja. Kadang-kadang dapat dipahami juga bunyi pepatah "bisa karena biasa". Itulah si spesialis.

Untuk suatu konstruksi yang diragukan pemasangannya di lapangan, maka dapat juga setelah selesai fabrikasi dilakukan proses **pra-perakitan** sebelum dikirim ke lapangan. Biasanya ini diperlukan untuk modul-modul berulang, misalnya rangka baja standar, atau menara listrik tegangan tinggi. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa tidak ada permasalahan nanti saat perakitannya di lapangan. Jadi sebaiknya dicoba dan dipastikan terlebih dahulu.

8.3. Transportasi

Jika sudah tak ada keraguan bahwa modul konstruksi baja yang dibuat pada proses fabrikasi telah selesai secara keseluruhan, maka tahapan selanjutnya adalah mengangkutnya ke proyek lapangan. Tentu saja alat angkut yang digunakan tergantung dari jenis dan lokasi proyeknya. Jika digunakan truk tronton di jalan raya maka umumnya diambil ketetapan praktis bahwa panjang modul yang diangkut tidak lebih dari 15 meter, pada kondisi khusus tentu bisa lebih sedikit. Jika di laut tentu saja dibutuhkan kapal yang dapat menjangkau lokasi proyek, sebagaimana terlihat pada proyek Jembatan Suramadu belum lama ini (2005-2009).



Gambar 49. Transportasi dan erection segmen jembatan Suramadu *(Sumber : L. Hidayat)*

8.4. Erection

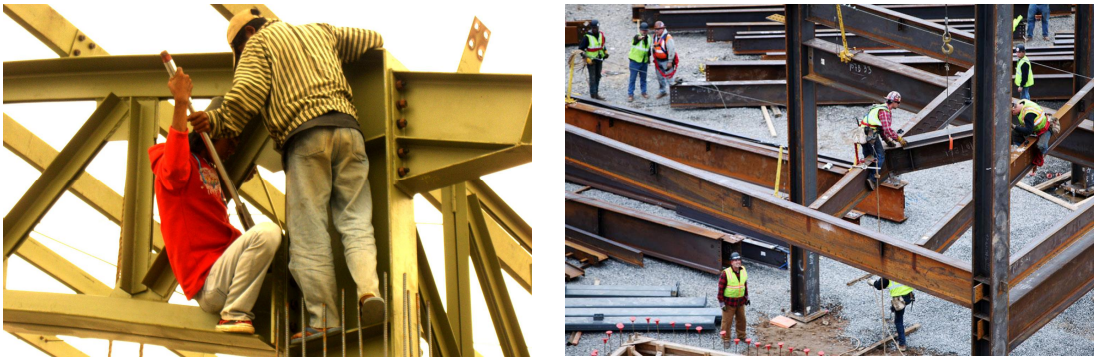
Proses *erection* adalah proses perakitan modul-modul struktur untuk disambung satu dengan yang lain membentuk kesatuan struktur sesuai rencana. Prosesnya sendiri sangat tergantung kondisi lapangan dimana proyek tersebut dilaksanakan. Oleh karena karakter lapangan antara proyek bangunan gedung dan jembatan berbeda, maka strategi *erection*-nya juga berbeda.

Bangunan gedung atau industri umumnya terletak pada bidang tanah yang telah diolah rapi, relatif datar, dan karena direncanakan untuk tempat hunian maka lokasinya tentu terjangkau. Jadi akses bagi pekerja, alat dan sebagainya ke proyek bangunan gedung mestinya tidak ada masalah, sehingga tidak ada hal khusus dan dianggap biasa. Oleh sebab itu strategi *erection* umumnya akan diserahkan kepada kontraktor untuk memilihnya yang paling ekonomis.

Karena alasan itu, maka para perencana proyek baja untuk gedung tidak terlalu memikirkan secara khusus strategi *erection*-nya. Mereka hanya berkonsentrasi pada perencanaan struktur pada konfigurasi final, sedangkan konfigurasi pada tahap pelaksanaannya tidak dipikirkan.

Kebiasaan ini kadang membuat kontraktor melakukan modifikasi detail dengan alasan agar sesuai dengan peralatan yang mereka punyai. Oleh karena itu, untuk sistem struktur yang dianggap khusus, yang akan terpengaruh gaya-gaya internalnya oleh tahapan pelaksanaan maka perlu perhatian khusus. Kasus yang dimaksud sudah ditinjau di bab 5.6 dimana lokasi penempatan sambungan yang dirubah akan menghasilkan gaya internal yang berubah pula, yang akibatnya ada beberapa elemen struktur menjadi *over-stress* dan dapat berbahaya.

Kalaupun tidak berubah dari rencana awal, tetapi karena adanya kebebasan kontraktor untuk memilih metoda pelaksanaan kadang ada beberapa hal yang tidak diperhatikan dan beresiko. Seperti tentang K3 bagi pekerjanya yang kadang tidak mencukupi, yang penting untung. Untuk mendapatkan gambaran itu ada baiknya dilihat perbandingan kondisi kerja pada saat *erection* yang satu proyeknya berlokasi di Jabotabek (hasil kerja praktek mahasiswa UPH) dan yang satunya lagi dari luar negeri (internet). Perhatikan dan bandingkan antara keduanya kelengkapan K3 yang dipakai, seperti sabuk, helm dan sepatu penyelamatnya.

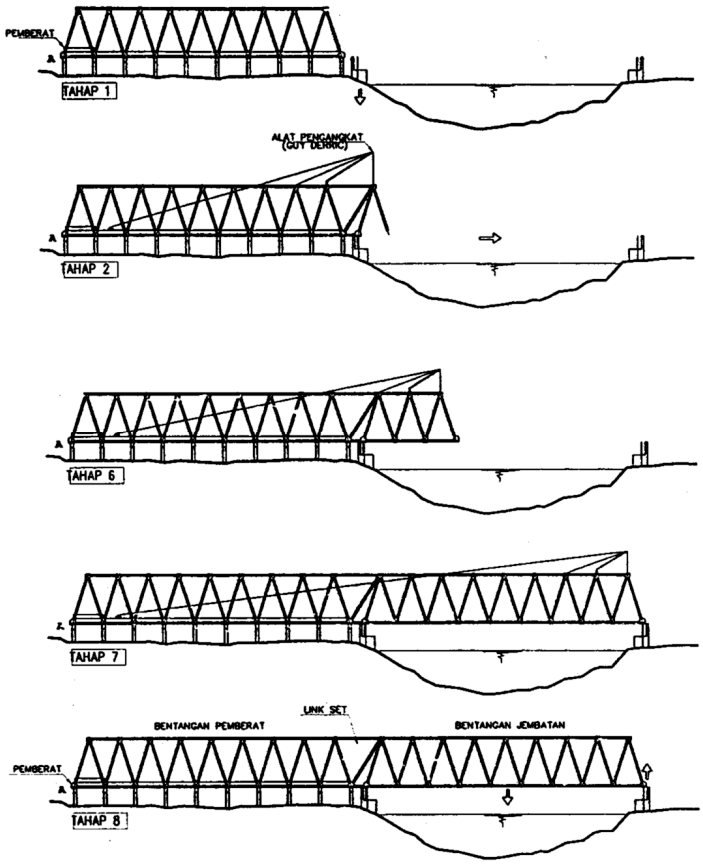


a). Jabotabek ***b). Luar negeri***

Gambar 50. Kondisi K3 pada proses erection bangunan baja

Jika masalah K3 saja yang menyangkut nyawa pekerja diabaikan, maka bisa saja hal-hal lain yang menyangkut stabilitas elemen baja yang dirakit juga terabaikan. Hasilnya malapetaka tidak hanya bagi pekerjanya tetapi juga bagi kelangsungan proyek konstruksi baja tersebut. Ini yang harus diperhatikan pada pelaksanaan *erection* di bangunan gedung.

Pelaksanaan *erection* proyek jembatan seringkali mendapatkan kondisi lapangan yang lebih berat, tidak gampang menempatkan alat-alat berat untuk mengangkat modul-modul struktur yang akan dirangkai. Oleh karena hal itu, maka pada saat perencanaan telah diperhitungkan secara matang metoda pelaksanaan yang akan dipakai, yang umumnya memanfaatkan modul yang akan dipasang, seperti misalnya teknik kantilever pada bangunan rangka baja standar.



Gambar 51. Metode erection tipe kantilever dalam dokumen perencanaan

Meskipun secara real, situasi dan kondisi lapangan proyek jembatan lebih berat, medan yang belum tentu pernah dijamah manusia yang umum, maka mendatangkan alat berat merupakan sesuatu yang tidak sederhana dan murah. Tetapi karena hal tersebut sudah dipertimbangkan selama tahapan perencanaan, yang tentunya dapat dicari berbagai alternatif jenis jembatan yang kondisinya paling optimal. Jadi adanya metode pelaksanaan yang sekaligus dengan dokumen perencanaan lain akan menyebabkan persyaratan ideal pelaksanaan, termasuk K3 dapat ditentukan sebelum kontrak ditanda-tangani. Dengan demikian, tidak mengherankan jika pelaksanaan proyek konstruksi bangunan jembatan akan lebih tertata dan lancar.

Gambar 52. Proses erection jembatan Berbak, Jambi *(Sumber: L. Hidayat)*

9. PERAWATAN BANGUNAN BAJA

Jangan dibayangkan ketika kegiatan konstruksi bangunan baja selesai maka tidak diperlukan perhatian lagi. Bangunan selanjutnya tinggal dipakai untuk selama-lamanya, sampai rusak. Jika demikian, jika tidak lama setelah dibangun kemudian rusak apakah itu berarti umurnya telah tiba, seperti orang yang mati, lalu dikatakan **NASIB**.

Bisa juga ada yang berpendapat bahwa umur bangunan itu terbatas, misalnya angka 50 atau 100 tahun, sehingga ketika umur tersebut tercapai maka bangunan tersebut harus dibongkar. Itulah berita yang sering terdengar yang disampaikan kepada awam bila merujuk pada suatu kerusakan bangunan yang langsung dikaitkan dengan umurnya. Jadi ketika ditemukan bahwa umurnya sudah 50 tahun (atau angka yang lain) maka dianggap sebagai suatu kewajaran.

Apakah memang seperti itu yang terjadi. Padahal standar perencanaan yang ada, apakah itu SNI atau AISC tidak pernah mendefinisikan secara jelas bahwa usia perencanaannya akan terbatas, sehingga pada usia tertentu harus dibongkar. Untuk itu bandingkan hal berikut.

a). Bantar Lama - Yogjakarta (1932) ***b). Roebling – Ohio (1867)***

Gambar 53. Jembatan-jembatan tua di dunia

Jembatan Bantar Lama berada di daerah Yogyakarta umur 79 tahun, kondisinya hanya boleh dilewati sepeda atau pejalan kaki, sedangkan jembatan Roebling di Ohio berumur 144 tahun, meskipun lebih tua terlihat berfungsi lebih baik. Dengan demikian usia suatu bangunan tidak dapat menjadi patokan, apakah suatu bangunan harus dibongkar atau tidak.

Faktor apa yang menyebabkan itu, pada bagian perencanaan atau pelaksanaan, kiranya tidak ada yang disebutkan. Menurut penulis yang membedakannya adalah **faktor perawatannya**. Nah disinilah peran adanya perawatan yang baik atau tidak dari suatu bangunan konstruksi. Jika perawatannya baik maka dapat dipastikan fungsi suatu bangunan menjadi tidak terbatas, tentu selama pemakainya masih suka dan masih diperlukan, maka bangunan diyakini masih ada. Untuk itu boleh saja berganti fungsi, seperti dulu alat penghubung transportasi penting (jembatan), sekarang berubah jadi daya tarik pariwisata (monumen) pendulang devisa.

Tindakan perawatan baja di jembatan lebih *urgent* dibanding gedung, sebab [a] pembebanan jembatan variasinya lebih tinggi dan beresiko terhadap *fatigue*, [b] lokasi ditempat terbuka sehingga rentan terhadap pengaruh lingkungan alam. Jadi adanya ketidak-sempurnaan dalam proses perencanaan dan pelaksanaan akan mengakibatkan biaya perawatan lebih tinggi.

10. TULISAN TENTANG BAJA

10.1. Pentingnya tulisan dan publikasi

Menulis adalah suatu bentuk komunikasi yang paling penting, karena apa yang ada di dalam pikiran dapat diekspresikan untuk dimengerti orang lain, tanpa perlu kehadiran penulisnya. (Dewobroto 2009). Jadi tulisan juga merupakan dokumentasi pikiran, karena dapat disimpan maka isi pikiran-pikiran tersebut akhirnya terakumulasi. Tidaklah heran jika dari tulisan itu pula maka masa depan masyarakat akan terpengaruh. Sebagaimana prospek dan kendala tentang pemakaian konstruksi baja juga bisa langsung diketahui dari membaca tulisan ini.

Adanya keinginan untuk memasyarakatkan (mempopulerkan) penggunaan konstruksi baja di tanah air rasanya hanya dapat terwujud jika didukung oleh adanya tulisan-tulisan positip tentang hal itu. Penyelenggaraan seminar baja kali ini juga dapat dianggap suatu upaya positip untuk mewujudkan ide tersebut. Meskipun demikian keberhasilan cara tersebut juga ditentukan oleh besarnya kuantitas penetrasi ke masyarakat yang dilakukan, variabelnya adalah **jumlah peserta hadir** dan **frekuensi penyelenggaraannya** tiap tahunnya. Untuk itu jelas diperlukan kerja keras, waktu dan yang tidak kalah pentingnya adalah dana (sponsor). Jadi diperlukan kerja sama yang baik antara industri, perguruan tinggi dan asosiasi profesi.

10.2. Ketersediaan tulisan tentang baja

Dari uraian sebelumnya, banyak hal dapat diungkapkan berkaitan konstruksi bangunan baja. Itu semua juga menunjukkan bahwa agar hasilnya baik, sesuai rencana, maka para pelaksana yang terlibat memerlukan keahlian yang cukup, dan itu perlu waktu mempelajarinya. Untuk sesuatu yang populer atau dominan, maka tempat belajarnya tentu relatif mudah dibanding yang tidak populer atau jarang. Itu terkait dengan banyaknya para ahli untuk dijadikan guru tempat bertanya. Jika itu tidak ada, atau ada tetapi yang bersangkutan beralasan tidak punya waktu atau takut akan bertambah saingan bisnisnya, maka satu-satunya sarana belajar adalah melalui buku-buku teks, jurnal-jurnal ilmiah atau publikasi tertulis yang ada tentang hal itu.

Jadi ketersediaan literatur atau tulisan tentang konstruksi baja dapat dikaitkan dengan banyak atau tidaknya profesional yang akan menguasai materi tersebut. Jika banyak ahli baja maka bisa saja material tersebut menjadi pilihan jika ada proyek konstruksi. Jadi cukup wajar jika ingin mempopulerkan konstruksi baja di proyek-proyek konstruksi maka dapat dilakukan dengan cara mempublikasikan sebanyak mungkin literatur tentang baja atau yang terkait.

Keberadaan literatur baja mancanegara sebenarnya mudah diperoleh dengan adanya internet, karena ternyata di dunia maya banyak sekali *ebook* tentang baja yang dapat di *download*. Tetapi karena ada kendala bahasa maka yang mendapatkan keahlian dari buku itu akhirnya menjadi terbatas juga. Jadi alangkah baiknya jika ada buku-buku baja berbahasa Indonesia.

Untuk itu siapa yang dapat diharapkan, tentu tidak mudah menjawabnya. Profesional yang ahli di bidang struktur baja di Indonesia jelas pasti ada, tetapi yang mempunyai keahlian dan sekaligus mampu menulis secara baik sehingga banyak yang membaca tulisannya, tentu itu masalah yang berbeda. Cara mudah mengatasinya adalah penerjemahan buku-buku asing yang telah terbukti. Tetapi siapa yang mau mengusahakannya, karena untuk itu diperlukan dana atau modal. Saat ini, kebanyakan yang berinisiatif melakukan penerjemahan dan memasarkan buku yang dimaksud adalah penerbit yang mengkhususkan diri pada buku-buku teknik. Tetapi jika itu yang diharapkan, motivasi utamanya adalah keuntungan finansial semata. Buku yang dipilihpun pasti hanya buku-buku tertentu yang pasarnya ada, misalnya buku teks untuk perguruan tinggi. Sedangkan buku tingkat lanjut (*advance*), yang umumnya relatif berat dibaca awam atau tingkat mahasiswa maka pasarnya relatif sangat sempit. Jadi kalau akan diterbitkan beresiko tinggi untuk merugi. Untuk kasus-kasus ini maka mencari penerbit yang mau adalah tidak mudah. Pendapat ini timbul atas dasar pengalaman penulis saat mencari penerbit untuk buku-bukunya (Dewobroto 2003, 2004, 2005, 2007b).

Oleh karena itu ada baiknya, jika ada pihak yang mau memberi sponsor penerbitan buku-buku semacam itu. Pihak itu tentunya adalah yang punya modal besar dan mau berinvestasi untuk suatu tujuan tertentu yang lebih besar dari sekedar mendapatkan keuntungan finansial dari penjualan buku-buku tersebut. Penulis berpendapat, pihak yang dimaksud yang paling cocok adalah konsorsium industri baja atau semacamnya. Logikanya cukup jelas, investasi dalam bentuk penerbitan buku-buku tersebut, nilainya tentu tidak sebanding dengan adanya keuntungan finansial jika produk-produknya dicari orang untuk dipakai pada konstruksi baja. Inilah yang mungkin disebut *link-and-match* antara industri – praktisi – perguruan tinggi.

10.3. Literatur baja dan asosiasi profesi di USA

Apa yang disampaikan di atas adalah bukan angan-angan, tetapi memang suatu kondisi yang sudah terjadi di negara-negara industri maju. Selanjutnya akan diambil sebagai studi kasus di Amerika Serikat (dan Kanada), dimana ketersediaan literatur yang terkait dengan produk baja sangat melimpah. Kondisi itu tidak bisa dilepaskan dari keberadaan asosiasi-asosiasi profesi atau asosiasi industri yang mewadahinya. Asosiasi-asosiasi tersebut saling bahu-membahu membentuk suatu komunitas saling menguntungkan, antara industri, praktisi lapangan (insinyur dan kontraktor) maupun para periset di lembaga riset profesional maupun perguruan-perguruan tinggi. Dari komunitas seperti itulah publikasi mereka berkembang.

Amerika Serikat (dan Kanada), adalah negara industri maju yang konstruksi bajanya relatif maju juga, bahkan kemungkinan lebih dominan dibanding beton. Itu terjadi karena keberada-annya didukung oleh banyaknya asosiasi-asosiasi profesi yang produktif, misalnya:

1. AISC (The American Institute of Steel Construction) - http://www.aisc.org
   a. AISC Specification for Structural Steel Buildings [**code / standar**]
   b. AISC Engineering Journal [**jurnal ilmiah**]
   c. Steel Design Guide Series [**kumpulan buku**]
   d. Modern Steel Construction [**majalah ilmiah**]
2. AIST (The Association for Iron & Steel Technology) - http://www.aist.org
   a. Iron & Steel Technology [**majalah bulanan**]
   b. AIST Directory Iron and Steel Plants [**buku direktori**]
   c. AIST Scholarships and Grants [**beasiswa**]
   d. AIST Conferences [**program seminar**]
3. AISI (The American Iron and Steel Institute) - http://www.steel.org
   a. Cold-Formed Steel Design Manual [**code / standar**]
   b. Ferrous Metallurgy Education Today [FeMET] [**beasiswa**]
4. ASCE (The American Society of Civil Engineers) - http://www.asce.org
   a. There are more than 60 published ASCE Standards.
   b. There are more than 33 engineering journals.
   c. Books and CD-ROMs and the backlist of more than 1,000 titles.
   d. Civil Engineering [**majalah bulanan**]
5. ASM (The American Society of Metals) - http://www.asminternational.org
   a. Metallurgical and Materials Transactions A [**jurnal ilmiah**]
   b. Metallurgical and Materials Transactions B [**jurnal ilmiah**]
   c. ASM Handbook Set (26 Volumes + Index) [**buku**]
   d. The History of Stainless Steel [**buku**]
6. AWI (The American Welding Institute) - http://www.altraininspections.com
   a. Self Study Course [**kursus**]
   b. Gas Metal Arc Welding (GMAW - MIG) [**kursus**]
   c. Certified Welding Inspector Prep Course, Seminar & Test [**seminar / kursus**]
7. AWS (The American Welding Society) - http://www.aws.org
   a. Structural Welding Code – Steel [**code / standar**]
   b. Welding Journal [**jurnal**]

c. Welding Journal Research Supplement [**jurnal**]
d. Welding Handbook. [**buku**]

8. CISC (The Canadian Institute of Steel Construction) - http://www.cisc-icca.ca
   a. CISC Code of Standard Practice [**code / standar**]
   b. Limit States Design in Structural Steel [**buku**]
   c. Advantage Steel [**majalah**]
   d. Avantage Acier [**majalah versi bahasa Perancis**]
9. IFI (The Industrial Fasteners Institute) - http://www.indfast.org
   a. IFI Fastener Technology Handbook [**buku**]
   b. Metric Fastener Standards, 3rd Edition [**buku**]
   c. ISO Metric Screw Thread and Fastener Handbook [**digital download**]
10. JFLF (The James F. Lincoln Arc Welding Foundation) - http://www.jflf.org
    a. Design of Welded Structures [**buku**]
    b. Weld Steel Bridges [**buku**]
    c. Gas Tungsten Arc Welding Guide Book (JFLF-834) [**buku**]
11. MBMA (The Metal Building Manufacturers Association) - http://www.mbma.com
    a. 2006 Metal Building Systems Manual [**buku**]
    b. 2010 Supplement to the 2006 Metal Building Systems Manual [**buku**]
    c. Seismic Design Guide for Metal Building Systems [**buku**]
    d. Fire Resistance Design Guide for Metal Building Systems [**buku**]
12. ML/SFA (The Metal Lath / Steel Framing Association)
    a. Light Gage Steel Framing Specifications [**booklets**]
13. NAAMM (The National Association of Architectural Metal Manufacturers) - http://www.naamm.org
    a. Metal Finishes Manual [**buku**]
    b. Pipe Railing Manual [**buku**]
14. NACE (The National Association of Corrosion Engineers) - http://www.nace.org
    a. NACE - CORROSION [**jurnal ilmiah**]
    b. Performance (MP) [**majalah bulanan**]
    c. Coatings Pro [**majalah dwi-bulanan**]
    d. CorrDefense [**majalah online**]
    e. ANSI/NACE No. 13/SSPC-ACS-1 Industrial Coating and Lining Application Specialist Qualification and Certification [**code / standar**]
15. NEA (The National Erectors Association) → TAUC (The Association of Union Constructors) - http://www.tauc.org
    a. The Construction User [**majalah triwulan**]
    b. The Quality Construction Alliance [**konferensi tahunan**]
    c. The Importance of Safety [**video**]
16. NISD (The National Institute of Steel Detailing) - http://www.nisd.org
    a. NISD Guidelines for Successful Presentation of Steel Design Documents [**booklets**]
    b. NISD Industry Standard [**buku**]
    c. Hot Dip Galvanizing "What We Need To Know" [**buku**]
    d. Painting And Fireproofing "From a Detailer's Perspective" [**buku**]
17. SDI (The Steel Deck Institute) - http://www.sdi.org
    a. Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks [**buku**]
    b. SDI Manual of Construction with Steel Deck - No. MOC2 [**buku**]
    c. Composite Steel Deck Design Handbook - No. CDD2 [**buku**]
18. SJI (The Steel Joist Institute) - http://steeljoist.org
    a. Standard Specifications for Open Web Steel Joists, K-Series [**buku**]
    b. First Edition Composite Steel Joist Catalog (2007) [**buku**]
    c. TECHNICAL DIGEST [**kumpulan buku**]

19. SPFA (The Steel Plate Fabricators Association) - http://www.steeltank.com
    a. Standard for Aboveground Tanks [**code / standar**]
    b. Standard for Dual Wall Underground Steel Storage Tanks [**code / standar**]
    c. Handbook of Storage Tank Systems [**buku**]
    d. Basic Safety Rules for Fabrication, Field Erection, and Warehousing [**Booklets**]
20. SSPC (The Steel Structures Painting Council) - http://www.sspc.org
    a. Good Painting Practice, SSPC Painting Manual, Volume 1 [**code / standar**]
    b. Systems and Specifications - SSPC Painting Manual, Volume 2 [**code / standar**]
    c. Corrosion and Coatings [**buku**]
    d. Corrosion Prevention by Protective Coatings [**buku**]
21. STI (The Steel Tube Institute of North America) - http://www.steeltubeinstitute.org
    a. HSS_connex [**software computer**]
    b. Applications/Case Studies [**booklets**]
    c. Cost Comparison /Brochure/Case Studies [**booklets**]
    d. Metric Dimensions and Section Properties of Rectangular HSS [**booklets**]
    e. Designs for the 21st Century [**video clips**]
22. WRC (The Welding Research Council)
    a. Welding Research Council Bulletin [**buletin**]
    b. Weldability of Steel [**buku**]

Daftar di atas memuat berbagai nama asosiasi profesi / industri dan publikasinya di Amerika, mungkin tidak lengkap, tapi minimal menjadi petunjuk bahwa mempromosikan produk baja untuk konstruksi bangunan ternyata tidak hanya kerja keras industrinya saja (pabrik baja), tapi menyeluruh oleh segenap asosiasi profesi yang terlibat dan itu ditunjang produktivitas publikasi tertulis yang dapat dengan mudah diakses anggotanya.

Gambar 54. Beberapa Sampul Majalah tentang Konstruksi Baja

Jadi ada bukti yang menunjukkan bahwa ada korelasi kuat antara ketersediaan publikasi dan pengetahuan orang terhadap materi publikasi tersebut. Jadi jika produk baja ingin dikenal dan dapat menjadi pilihan masyarakat (yang berminat tentunya) maka perlu mulai dipikirkan dan diusahakan bagaimana agar ketersediaan publikasi tertulis berkaitan dengan produk baja dan pemakaiannya meningkat. Untuk itu perlu diusahakan kerjasama antara industri, asosiasi profesi dan jangan dilupakan para pakar di perguruan tinggi.

11. KESIMPULAN

Telah diungkap banyak hal yang terkait pemakaian material baja pada konstruksi gedung dan jembatan. Kendala-kendala yang perlu diperhatikan agar tidak menimbulkan masalah, tetapi juga hal-hal yang merupakan prospek menguntungkan. Selain kendala teknis diungkapkan juga adanya kendala non-teknis, yaitu ketersediaan publikasi tertulis yang terbatas terkait material baja. Meskipun ini terkesan sepele, tetapi diyakini akan menjadi alat efektif dalam mempromosikan pemakaian material baja pada konstruksi bangunan di Indonesia.

12. UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini ditulis secara khusus dan seksama sebagai ucapan terima kasih atas undangan PT. Krakatau Steel agar penulis berpartisipasi aktif dalam seminar di Balroom Mutiara Hotel Gran Melia – Jakarta (7 April 2011). Karena tema seminar adalah promosi pemakaian baja dengan peserta yang beragam maka dipilih judul : "***Prospek dan Kendala pada Pemakaian Material Baja untuk Konstruksi Bangunan di Indonesia***". Suatu tema yang luas cakupannya. Jadi mohon dimaklumi jika makalahnya sendiri berbobot (tebal) dibanding tulisan untuk jurnal atau seminar yang biasa. Ini penting disampaikan karena material baja adalah unggul sehingga banyak digunakan negara-negara maju tetapi di Indonesia masih biasa-biasa saja. Semoga pemikiran yang disampaikan dapat memicu pemikiran lain yang lebih berbobot agar dapat ditindak-lanjuti bagi yang berwewenang untuk kepentingan kemajuan bangsa.

Makalah dapat selesai secara cepat karena baja merupakan peminatan penulis sejak lama dan juga adanya dukungan data yang bersumber : [a] penelitian penulis yang didanai UPH; [b] data JSS dari Prof. Wiratman; [c] data jembatan-jembatan Indonesia dari ibu Lanny Hidayat, widyaiswara Kementrian PU; [d] Laporan Kerja Praktek di Jurusan Teknik Sipil, UPH; serta [f] komunitas intelektual dunia maya melalui blog (http://wiryanto.wordpress.com).

Untuk semuanya, penulis mengucapkan terima kasih. Berkat Tuhan beserta kita semua.

Always make sure you are right and then - go for it.

David Crockett

13. DAFTAR PUSTAKA

AISC. (2010). "*ANSI/AISC 360-10 : Specification for Structural Steel Buildings*", AISC, Chicago, Illinois

AISC. (2005a). "*ANSI/AISC 360-05: Specification for Structural Steel Building*", AISC, Chicago, Illinois

AISC. (2005b). "*ANSI/AISC 341-05 : Seismic Provisions for Structural Steel Buildings"*, AISC, Chicago, Illinois

AISC. (1992). "*Manual of Steel Construction – Volume II Connections ASD 9th Ed./LRFD 1st Ed.*", AISC, Chicago

Basha, H.S. and Subhash C. Goel. (1996). "*Seismic Resistant Truss Moment Frames with Ductile Vierendeel Segment*", Paper No.487. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd.

Blodget.(1976). "*Design of Welded Structures*", The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland Ohio

Boyer, J.P. (1964)."*Castellated Beams – Developments*", AISC Engineering Journal, July

CSI. (2007). "*Steel Frame Design Manual AISC 360-05/IBC2006 - for SAP2000 & ETABS*", CSI, Berkeley

Daly, A.F. and Wawan Witarnawan.(). "*A method for increasing the capacity of short and medium span bridges - External post-tensioning"*, (file pdf di internet)

Dewobroto, W., dan Wawan Chendrawan. (2010) "*Resiko Otomatisasi Komputer pada Perancangan Struktur - Studi Kasus : Analisis dan Desain Struktur Balok Baja*", Seminar HAKI 2010, Jakarta , 4 Agustus 2010

Dewobroto, W. (2010)."*Dampak Pemakaian 'Design Preference' pada Rancangan Struktur - Studi Kasus : Analisis dan Design Balok Baja memakai SAP2000 v 11*", KoNTekS 4, Unud-UAJY-UPH, Sanur,Bali

Dewobroto, W. (2009). "*Insinyur perlu Menulis Publikasi*", Invited speaker Workshop Penulis Muda oleh Forum Anggota Muda – Persatuan Insinyur Indonesia , Jakarta

Dewobroto, W. (2007a). "*STRUKTUR JEMBATAN TERINGAN dan TERKUAT (TERKOKOH) – Studi kasus : Jembatan Model UPH pada KJBI 2005 dan KJI 2006*", National Conference on Prospected Technology 2007 (NCPT 2007)", Universitas Maranatha, 24-25 Agustus 2007, Bandung

Dewobroto, W . (2007b). "*Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP2000 – EDISI BARU*", PT. Elex Media Komputindo, Jakarta.

Dewobroto, W., Sahari Besari dan Bambang Suryoatmono. (2006). "*Perlunya Pembelajaran Baja Cold-Formed dalam Kurikulum Konstruksi Baja di Indonesia*", Lokakarya Pengajaran Mekanika Teknik, Beton dan Baja, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jimbaran, Bali

Dewobroto, W. (2005). "*Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan Visual Basic 6.0 : Analisis dan Desain Penampang Beton Bertulang sesuai SNI 03-2847-2002*", PT. Elex Media Komputindo, Jakarta

Dewobroto, W . (2004). "*Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP2000*", PT. Elex Media Komputindo, Jakarta.

Dewobroto, W. (2003). "*Aplikasi Sain dan Teknik dengan Visual Basic 6.0*", PT. Elex Media Komputindo, Jakarta.

Densford, T., Thomas L. Hendrick and Thomas M. Murray. (1990). "*Short Span Prestressed Steel Bridges*", AISC Engineering Journal, Third Quarter

Geschwinder, L.F. (2008). "*Unified Design of Steel Structures*", John Wiley & Sons., Inc.

Hamburger, R.O., Helmut Krawinkler, James O. Malley, Scott M. Adan. (2009). "*NIST GCR 09-917-3 : Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers*", U.S. Department of Commerce and The National Institute of Standards and Technology (NIST)

Kuchenbecker, G.H., White, D.W. and Surovek-Maleck, A.E. (2004), "*Simplified Design of Building Frames Using First-Order Analysis and K =1*," Proceedings of the Annual Technical Session and Meeting, Long Beach, CA, March 24-27, 2004, Structural Stability Research Council, Rolla, MO, pp. 119–138.

Kodur, V.K.R.(2003). "*Role of Fire Resistance Issues in The Collapse of The Twin Towers*", Proceedings of the CIB-CTBUH Int. Conference on Tall Buildings, 8-10 May 2003, Malaysia

McCormac, J. (2008). "*Structural Steel Design 4th Ed.*", Pearson International Edition, USA.

Sabelli, R., and Walterio López. (2004). "*Design of Buckling-Restrained Braced Frames*", Modern Steel Construction

Salmon, C.G., J.E. Johnson and F.A. Malhas. (2009). "*Steel Structures: Design and Behavior - Emphazing Load and Resistance Factor Design, 5th Ed.*", Pearson Int. Ed..

Seilie, I.F., and John D. Hooper.(2005). "*Steel Plate Shear Walls: Practical Design and Construction*", April 2005 Modern Steel Construction

Segui, W.T.(2007). "*Steel Design 4th Ed*"., Cengage Learning

Rittironk, S. & M. Elnieiri. (2008). "*Investigating laminated bamboo lumber as an alternate to wood lumber in residential construction in the United States*", Illinois Institute of Technology, Chicago, (in Modern Bamboo Structures – Xiao et al. (eds), Taylor & Francis Group, London)

Vinnakota, S. (2006). "*Steel Structures : Behavior and LRFD*", McGraw-Hill Int. Edition

Wei-Wen Yu. (2000). "Cold-Formed Steel Design 3rd Ed.", John Wiley & Sons. Inc.

Zarkasi, I. (2005). "Catatan Kondisi Jembatan Rangka Baja Callender Hamilton yang Masih difungsikan di Beberapa Ruas dan Perlu diwaspadai", (file pdf di internet)

Tentang Penulis

Dr. Ir. Wiryanto Dewobroto, MT., adalah Dosen Profesional dan Lektor Kepala pada mata kuliah Struktur Baja di Jurusan Teknik Sipil, FDTP, Universitas Pelita Harapan, Tangerang.

Pendidikan sarjana teknik sipil UGM, Yogyakarta (1989), magister teknik sipil UI, Jakarta (1998) dan doktor teknik sipil UNPAR, Bandung (2009). Karirnya diawali sebagai *structural engineer* di PT. Wiratman & Associates Jakarta (1989–1994), *manager teknik dan senior structural engineer* di PT. PS-Putra, Jakarta (1994–1998). Akibat krisis moneter, Juli 1998 berpindah haluan, meniti karir baru di dunia akademik sebagai pengajar, peneliti dan penulis. Bidang peminatan yang dinikmatinya adalah struktur baja-beton-kayu, analisa struktur, serta simulasi numerik berbasis komputer. Hobby lamanya selain membaca, menulis dan photografi digital, adalah bermain dengan komputer. Program yang dikuasai Visual Basic, Pascal, Fortran, Photoshop, AutoCAD, SAP2000, ETABS, SAFE, ABAQUS dan SolidWorks. Informasi terkini tentang kegiatannya sehari-hari sering dituliskannya pada blog dengan alamat http://wiryanto.wordpress.com.